



Arto Piispanen

## **Mittaustiedon hyödyntäminen kapean malmin louhinnassa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 22.02.2020

Valvoja: Professori Jussi Leveinen

Ohjaaja: DI Tuomo Hänninen

---

**Tekijä** Arto Piispanen

---

**Työn nimi** Mittaustiedon hyödyntäminen kapean malmin louhinnassa

---

**Maisteriohjelma** Geoengineering

**Koodi** ENG23

---

**Työn valvoja** Professori Jussi Leveinen

---

**Työn ohjaaja(t)** DI Tuomo Hänninen

---

**Päivämäärä** 22.02.2020

**Sivumäärä** 72+15

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Yksittäisten kapeiden malmijuoniesiintymien arvoainevarannot saattavat olla määrällisesti pieniä ja malmin kustannustehokas louhinta haasteellista. Kaivostoiminnan merkittäviä taloudellista kannattavuutta heikentäviä tekijöitä ovat liian suuret malmitappion ja sivukivilaimennuksen määrät. Louhintatyön toteutuksella ja onnistumisella on keskeinen vaikutus malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumiseen.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää, miten avolouhoksen louhituista kallio-  
penkereistä mitattuja geometriatietoja voidaan hyödyntää louhintatuloksen arvioinnissa ja louhintatyön kehittämisessä malmitappion ja sivukivilaimennuksen optimoinnin näkökulmasta. Työssä keskityttiin raonräjäytysmenetelmällä tarkkuuslouhittujen kallio-  
penkereiden louhintatulosten arviointiin malmitappion ja sivukivilaimennuksen määriä sekä louhinnan virhelähteitä tutkimalla. Tutkimuksen mittausmenetelmänä käytettiin droonilla suoritettua ilmakuvausta ja fotogrammetristen tekniikoiden yhdistelmää, jossa louhituista kallio-  
penkereistä kuvatuista digitaalisista valokuvista prosessoitiin tietokoneohjelmistojen avulla kolmiulotteisia kallio-  
penkereiden geometriaa edustavia pistepilviaineistoja. Tutkimusmenetelmiksi valittiin 3D-aineistojen ja niistä muodostettujen poikkileikkausten visuaalinen tarkastelu sekä tarkkuuslouhittujen kallioseinämien ja suunniteltujen kalliopintojen väliset tilavuuslaskennat ja poikkileikkauksista 3DResha-  
per-ohjelmistolla suoritettavat etäisyseromittaukset.

Tutkimuksen tulosten perusteella pääteltiin, että raonräjäytyksellä saavutetaan malmitappion ja sivukivilaimennuksen optimoinnin kannalta parempi louhintatulos kuin pelkällä pengerlouhinnalla. Tutkimuksen pieni otanta ja virhelähteet huomioon ottaen tilavuuslaskenta- ja etäisyseromittaus-  
tulosten perusteella ei voitu päätellä, että yli- tai alilouhintaa muodostuisi raonräjäytyksissä systemaattisesti toista enemmän. Poraustarkkuuden havaittiin olevan yksi merkittävimmistä tekijöistä malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumisessa.

Louhittujen kallio-  
penkereiden kolmiulotteisen geometriatiedon ja suunnitelma-aineistojen vertailun todettiin tuottavan hyödyllistä tietoa porauksen ja räjäytyksen onnistumisen arvioinnissa. Yli- ja alilouhintojen määrien laskenta tilavuuslaskelmilla ja etäisyseromittauksilla mahdollisti yksittäisten tarkkuuslouhintojen tulosten arvioinnin ja vertailun. 3D-aineiston ja poikkileikkausten visuaalisella tarkastelulla yli- ja alilouhittuja kohtia voitiin paikantaa ja louhinnan eri osa-  
alueiden virhelähteitä tutkia.

---

**Avainsanat** Malmitappio, sivukivilaimennus, raonräjäytys, avolouhos, tilavuuslaskenta, poikkileikkaus, 3D-aineisto, drooni, fotogrammetria

---



---

**Author** Arto Piispanen

---

**Title of thesis** Utilization of survey data in mining narrow ore bodies

---

**Master programme** Geoengineering

**Code** ENG23

---

**Thesis supervisor** Professor Jussi Leveinen

---

**Thesis advisor(s)** M.Sc. Tuomo Hänninen

---

**Date** 22.02.2020

**Number of pages** 72+15

**Language** Finnish

---

### **Abstract**

Narrow vein ore bodies may contain just small reserves of valuable minerals, and mining the ore cost-efficiently can be challenging. Large amounts of ore loss and waste rock dilution reduce the economic viability of the mine significantly. The execution and success of the mining excavation have an essential role in controlling the volume of ore loss and waste rock dilution.

The objective of this thesis was to investigate how the 3D-data surveyed from open-pit mine rock benches can be utilized for developing and evaluating Drill & Blast works from the perspective of optimizing the ore loss and waste rock dilution volumes. The thesis was focused on assessing the excavation results by estimating the volumes of ore loss and waste rock dilution and investigating sources of error in drilling and blasting. Most of the rock benches investigated were excavated using the pre-split blasting method.

The survey method used in this study was based on gathering aerial imagery by a UAV-drone and using those images and photogrammetric techniques for producing 3D point clouds. The data was analysed by investigating visually the point cloud data and cross-sections made from 3D-data, calculating volumes and measuring perpendicular distances between designed and blasted rock faces from numerous profiles using 3DReshaper software.

The results of the study showed that for optimizing the ore loss and waste rock dilution in mining narrow ore deposits, the pre-split blasting method is superior compared to conventional bench blasting methods. In consideration of small sample size and possible sources of error in research, it could not be concluded from volume calculations and distance measurement analyses that neither blast-induced overbreak or underbreak were dominant in pre-split blasting. Drilling accuracy was observed to be one of the most noteworthy factors to affect the volumes of ore loss and waste rock dilution.

The comparison between design data and 3D-models of the rock benches was discovered to produce useful information in assessing the results of drilling and blasting work. Calculations of volumes of overbreak and underbreak made it possible to assess and compare pre-split blasting results. Visual evaluation of surveyed 3D-data and cross-sections helped to locate areas of overbreak and underbreak, and investigate the reasons behind the possible errors in the excavation process.

---

**Keywords** Ore loss, waste rock dilution, pre-split blasting, open pit mine, volume calculation, cross-section, 3D-model, drone, photogrammetry

---

## Alkusanat

*Tämä diplomityö tehtiin Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoululle Bergwerk Oy:n toimeksiannosta ja rahoittamana. Ensimmäisenä haluankin esittää erityiskiitoksen Bergwerk Oy toimitusjohtajalle Tuomo Hänniselle erittäin mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta sekä työn ohjauksesta ja rahoituksesta. Suuri kiitos kuuluu työn valvojalle professori Jussi Leveiselle sekä ohjausryhmän jäsenille professori Mikael Rintelle ja TkT Lauri Uotiselle viisaista neuvoista ja ammattimaisesta ohjauksesta työn aikana.*

*Haluan kiittää Dragon Mining Oy:tä ja erityisesti yhtiön kaivospäälikköä Olli Pajulaa mahdollisuudesta suorittaa diplomityön tutkimusosuus Kaapelinkulman kaivoksella sekä kaikesta avusta ja perehdytyksestä geologian ja kaivostoiminnan saloihin. Kiitän kaivoksen urakoitsijan Maansiirtoliike Manninen Oy:n toimitusjohtajaa Tero Mannista ja kaivoksella toimivaa henkilöstöä opastuksesta sekä innostavista kokemuksista poraus- ja räjäytystöihin liittyen. Haluan kiittää myös opiskelutoveriani Henri Munukkaa drooneihin ja fotogrammetrisiin menetelmiin liittyvistä vinkeistä.*

*Lisäksi haluan kiittää äitiäni Kaisaa, isääni Markkua sekä avopuolisoani Juulias kaikesta tuesta, motivoinnista ja neuvoista diplomityöprojektin aikana.*

Espoo 20.02.2020

*Arto Piispanen*

Arto Piispanen



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	5
Lyhenteet .....	6
1 Johdanto .....	7
1.1 Ongelman kuvaus ja työn tausta .....	7
1.2 Tavoitteet ja rajaukset .....	7
2 Avolouhintamenetelmät .....	9
2.1 Pengerlouhinta .....	9
2.2 Tarkkuuslouhinta .....	14
3 Kalliopenkereiden geometrian mittauss avolouhinnassa .....	21
3.1 Mittaustekniikat .....	21
3.2 Kalliopenkereiden geometriatiedon hyödyntäminen .....	25
4 Tutkimuskohde .....	27
4.1 Kaapelinkulman kultakaivos .....	27
4.2 Kaapelinkulman malmiesiintymä .....	28
4.3 Louhinta kaivoksella .....	28
5 Tutkimusmenetelmät ja aineisto .....	31
5.1 Yleistä koejärjestelyistä .....	31
5.2 UAV-ilmakuvauks ja fotogrammetrinen mallinnus .....	32
5.3 Mittaustulosten analysointimenetelmät .....	35
6 Tulokset ja havainnot .....	41
6.1 Poikkileikkaukset ja visuaaliset havainnot 3D-aineistoista .....	41
6.2 Tilavuuslaskenta .....	55
6.3 Etäisyysseromittaukset poikkileikkausmenetelmällä .....	57
7 Tulosten analysointi ja pohdinta .....	60
7.1 Päätelmät poikkileikkauksista ja visuaalisista havainnoista .....	60
7.2 Tilavuuslaskentatulosten analyysi .....	62
7.3 Etäisyysseromittautulosten analyysi .....	63
7.4 Tulosten epävarmuudet ja virhelähteet .....	64
7.5 Kehitysehdotukset .....	64
7.6 Kokemukset ja suositukset menetelmistä ja laitteistoista .....	66
7.7 Jatkotutkimusehdotukset .....	67
8 Johtopäätökset .....	68
Lähdeluettelo .....	69
Liiteluettelo .....	72
Liitteet	

## Lyhenteet

GCP	Signaalipiste, tukipiste (Ground control point)
GNSS	Globaali satelliittipaikannusjärjestelmä (Global Navigation Satellite System)
GSD	Spatiaalinen resoluutio (Ground Sample Distance)
IMU	Inertiamittausyksikkö (Inertial Measurement Unit)
RTK	Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (Real Time Kinematic)
SfM	Structure-from-Motion
UAV	Miehittämätön ilma-alus (Unmanned Aerial Vehicle)
VRS	Virtuaalinen tukiasema (Virtual Reference Station)

# 1 Johdanto

## 1.1 Ongelman kuvaus ja työn tausta

Kapeat malmisuonet muodostavat merkittävät maailmanlaajuiset varannot hopealle, tinalle, uraanille sekä erityisesti kullalle. Kapeat alle 3 metrin levyiset malmisuonet ovat monimutkaisia geologisia ilmiöitä, joiden geometriaa ja mineraalikoostumusta on vaikea täsmällisesti määrittää. (Dominy ym. 1997, 317.)

Yksittäisten kapeiden malmijuoniesiintymien arvoainevarannot saattavat olla määrällisesti pieniä, ja malmin taloudellinen hyödynnettävyys on siten riskialtista malminetsinnästä ja kaivoksen perustamisesta sekä ylläpitämisestä aiheutuvien suhteellisen suurten kustannusten vuoksi. Kapeiden malmijuonien louhinnassa malmitappiot sekä sivukivilaimennus voivat merkittävästi heikentää kaivostoiminnan taloudellista kannattavuutta.

Louhinnasta aiheutuvan sivukivilaimennuksen ja malmitappion määrää voidaan etukäteen arvioida vertaamalla geologin muodostamia malmimalleja suunniteltuihin louhintakenttiin. Sivukivilaimennuksen ja malmitappion toteutunut määrä myös usein jää vain karkeaksi arvioksi perustuen louhintaurakoitsijan raportointiin malminkuljetusmääriin sekä rikastamolta saatuihin rikastusraportteihin. Raporttien perusteella ei kuitenkaan voida erotella minkälaiset vaikutukset esimerkiksi louheen lastauksessa suoritettavalla sivukiven ja malmin erotte-  
lulla, geologin muodostamien malmimallien tarkkuudella tai louhintatyön toteutuksella on rikastamol-  
le tuotaviin malmimääriin ja mineraalipitoisuuksiin.

Usein louhintatyön onnistumisella, tai pikemminkin epäonnistumisella, on suuri vaikutus malmitappion ja sivukivilaimennuksen määriin. Mikäli nämä määrät halutaan minimoida, on virhelähteitä selvitettävä erilaisilla mittauksilla. Virheiden havainnoinnin lisäksi mittaus-  
tiedolla on suuri merkitys virhelähteiden ennakkoinnissa tulevissa louhintatöissä sekä louhin-  
tatöiden suunnittelun tarkentamisessa.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Diplomityön tavoitteena on selvittää, miten kalliopenkereistä mitattavia geometriatietoja voidaan hyödyntää kapeiden malmijuonien avolouhintatulosten arvioinnissa sekä avo-  
louhinnan kehittämisessä malmitappion ja sivukivilaimennuksen optimoinnin näkökul-  
masta. Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Tuottaako kalliorintauksen 3D-mallintaminen hyötyä louhintatuloksen arvioinnissa ja louhintatyön kehittämisessä?
2. Miten malmitappion ja sivukivilaimennuksen määriä voidaan tutkia kapeiden malmijuonien avolouhinnassa mittaus-  
tiedon avulla?
3. Muodostuuko raonräjäytyksessä systemaattisesti enemmän yli- tai alilouhintaa?
4. Miten raonräjäytysmenetelmän hyödyntäminen vaikuttaa louhintatulokseen verrat-  
tuna normaaliin pengerlouhintaan?

Tässä diplomityössä mittaustiedon hyödyntämistä lähestytään avolouhoksen tarkkuuslouhitujen kalliopenkereiden geometriaa sekä louhintateknisiä asioita tarkastelemalla. Mittaustuloksia hyödynnetään toteutuneen räjäytys- ja louhintatyön arvioinnissa ja virhelähteiden havaitsemisessa. Louhintatyön tuloksena muodostunutta kalliorintausta verrataan suunniteltuun tarkkuuslouhintapintaan, poraussuunnitelmiin sekä mahdollisuuksien mukaan toteutuneisiin porausreikiin.

Diplomityön tutkimuksessa keskitytään erityisesti kapeiden malmijuonien louhintaan ja sen erityispiirteisiin. Laajat malmiesiintymät ja niihin liittyvät suuren tuotantokapasiteetin omaavat kaivoshankkeet eivät ole tutkimuksen pääasiallisena kohteena. Työn tarkoituksena on tehostaa kapeiden malmijuonien louhintaa avolouhoksella, joten maan alainen kaivostointi rajataan työn ulkopuolelle.

Työn tutkimus ja mittaukset suoritetaan Bergwerk Oy:n toimeksiannosta Kaapelinkulman kultakaivoksella Valkeakoskella, jossa malminlouhinta on aloitettu keväällä 2019. Kaivoksella malmitappion ja sivukivilaimennuksen minimoimiseen kiinnitetään louhinnassa erityistä huomiota, sillä

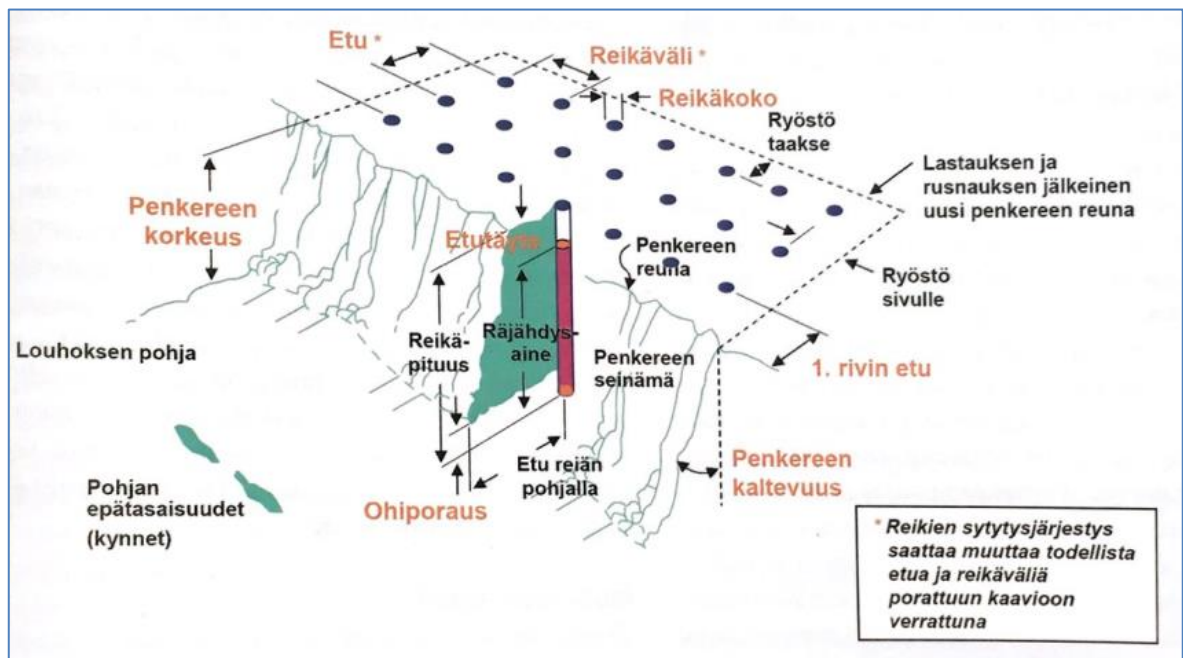
- kaivoksen arvioidut malmivarannot ovat määrällisesti pienet
- kulta esiintyy kvartsidioriittimuodostumassa useina kapeina malmilinsseinä, joiden väliin jää vaihtelevan paksuisia sivukivikerroksia
- kaivoksella ei ole omaa rikastamo, joten malminkuljetus noin 70 km päähän Vammalan rikastamolle muodostaa merkittävän osan kaivoksen kustannuksista.

## 2 Avolouhintamenetelmät

### 2.1 Pengerloughinta

#### 2.1.1 Johdanto pengerloughintamenetelmään

Yleisin ja tavanomaisin käytetty avolouhintamenetelmä on räjäyttämällä suoritettava pengerloughinta, jossa panostusreiät porataan ylemmältä työtasolta joko pystysuoraan alaspäin tai hieman kaltevasti räjäytettävän kalliorintauksen suuntaisesti. Louhittava kenttä koostuu yhdestä tai useammasta rivistä porausreikiä. Pengerloughinnassa räjäytettävälle kiviainekselelle on oltava vähintään kaksi vapaata purkautumissuuntaa, sillä kallio paisuu irrotessaan ja tarvitsee tilaa purkautua. Havainnekuva pengerloughinnasta sekä siihen liittyvistä käsitteistä on esitetty kuvassa 1. (Zou 2017, 285; Vuolio & Halonen 2010, 125, 142.)



Kuva 1. Pengerloughinnan käsitteitä ja parametrejä (Lappalainen ym. 2015, 110).

#### 2.1.2 Porausreiät

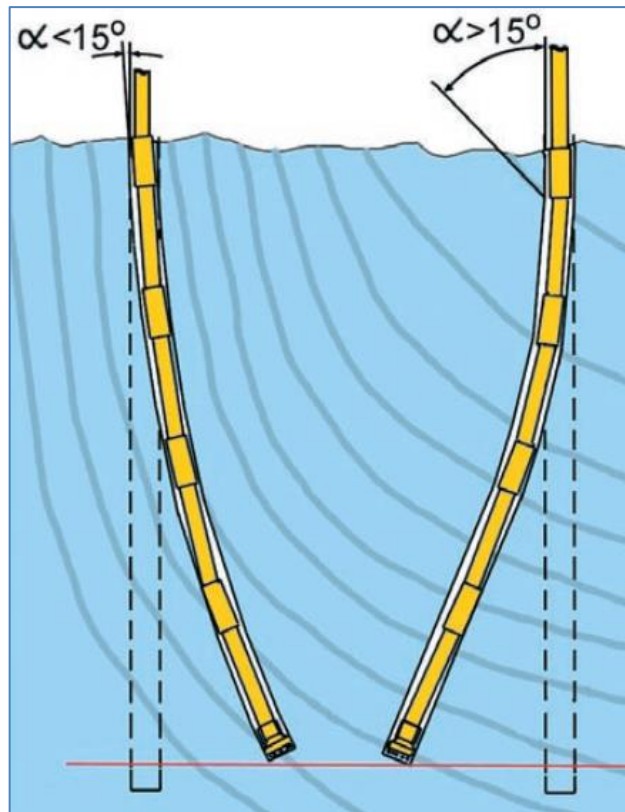
Pengerloughinnassa porausreikien reikäkoko (halkaisija) vaikuttaa moneen asiaan, kuten reikien sijoitteluun sekä tarvittaviin räjähdysainemääriin. Porareian reikäkoko taas riippuu pengerkorkeudesta, louhittavasta kuutiomäärästä, tavoitteellisesta lohkarakoosta, käytettävissä olevasta porauskalustosta, tarkkuuslouhinnan tapauksessa jäljelle jäävälle kalliolle asetettavista lujuusvaatimuksista, värinärarajoista sekä muista kohdekohtaisista rajoituksista. Reiän halkaisijaan voi vaikuttaa myös kallion laatu, sillä runsas- ja tiheärakoisessa kalliiossa liian pieni reikäkoko aiheuttaa reikien tukkeutumisvaaran. Suomessa pengerloughinnan porausreikien halkaisija vaihtelee 30-203 mm välillä ja avolouhoksilla pääosin käytetty reikäkoko on välillä 64-152 mm. Reikien porausmenetelmänä voidaan käyttää uppoporausta, päältälyötävää porausta tai kiertoporausta (Vuolio & Halonen 2010, 111, 125, 139-140, 142; Lappalainen ym. 2015, 111, 167.)

Pengerlouhinnassa käytetään sekä pystysuoria että kallistettuja panostusreikiä. Kallistettujen panostusreikiä käytetään etenkin kallion pohjaosan irrottamisen helpottamiseksi. Kun kallistetut reiät on porattu yhdensuuntaisesti louhittavan kalliorintauksen suuntaisesti, on ensimmäisen rivin reikien etu samansuuruinen reikien koko pituuden matkalla. Tämän etuna on kiven parempi rikkoutuminen, pienempi ryöstö reikien taakse sekä irrotetun kiviaineksen paremmin hallittu siirtymä ja paisunta kasalle. Kallistetut reiät mahdollistavat lisäksi tarvittavan ominaisporauksen ja -panostuksen pienentämisen ja räjähdysten paremman hallinnan, jolloin myös tärinät ja heittovaara pienenevät. (Zou 2017, 285; Vuolio & Halonen 2010, 142.)

Kallistettujen reikien mahdollisia haittapuolia pystysuoriin reikiin verrattuna taas ovat heikompi poraustehokkuus, pitemmät porausreiät ja siten porakaluston suurempi kuluminen sekä suuremmat poikkeamat porareikien taipumissa ja päättymissijainneissa. Kallistusten vuoksi on räjäytyksessä kiven siirtymälle myös pystykomponentti, joka voi osaltaan kasvattaa sinkoilevien kivien vaaraa, esimerkiksi louhittavan kalliorintauksen ollessa hyvin epätasainen. Yleisesti pengerlouhinnassa käytetään eteenpäin 6-18 asteen kulmalla kallistettuja reikiä. (Zou 2017, 285; Lappalainen ym. 2015, 111.)

Parhaimman louhintatuloksen saavuttamiseksi porattujen reikien on oltava suoria eikä reikien suunniteltujen sekä toteutuneiden sijaintien, kaltevuuksien ja päättymissyvyyksien välillä saa esiintyä suuria poikkeamia. Porausreikien poikkeamat voivat johtua esimerkiksi vääränlaisesta laitteistosta, virheellisestä porareian aloituspaikasta ja suuntauksesta. Porareian taipumaan eniten vaikuttavat kohteen geologiset ominaisuudet. Rakoilevassa kalliossa porausreikä voi taipua joko kohtisuoraan rakopintoihin nähden tai vaihtoehtoisesti rakojen kaateiden suuntaisesti riippuen reian suuntauksen ja rakojen välisestä kulmasta (kuva 2). Mitä rakoilevampaa kallio on, sitä suurempi riski on taipumalle. Lisäksi reikäsyvyyden kasvaessa reikien taipuma kasvaa eksponentiaalisesti. (Atlas Copco 2008, 15.)

Porausreikien taipumat ja poikkeamat päättymissyvyyksissä voivat aiheuttaa epätäydellisen louhintatuloksen etenkin kentän pohjaosassa. Epätasainen pohja vaikeuttaa louheen lastausta, ja kynsien rikottamisesta aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia. Siksi pengerkorkeuden kasvaessa reikiä on porattava tiheämpään, sillä porausreikien taipumat ja poikkeamat ovat myös suuremmat. (Olofsson 1997, 120; Persson 1994, 201.)



Kuva 2. Vasemmalla raon kaateen suuntaisesti taipunut porausreikä ja oikealla taipuma kohtisuoraan rakopintoihin nähden. Molemmissa tapauksissa poraussyvyys on taipuman vuoksi jäänyt suunniteltua pienemmäksi. (Atlas Copco 2008, 16.)

### 2.1.3 Räjähdysaineet ja sytytysvälineet

Pengerlouhinnassa käytettävät louhintaräjähdysaineet ovat seoksia, jotka tavallisesti koostuvat kahdesta tai useammasta komponentista. Välttämättömiä ainesosia ovat vähintään palava ainesosa eli polttoainekomponentti sekä happea tuottava komponentti eli hapetin. Seos sisältää usein myös räjähdysainekomponentin, joita ovat esimerkiksi trinitrotolueeni (TNT), pentriitti (PETN), nitroglykoli (NG) sekä heksogeeni (RDX). Louhintaräjähteissä yleisin raaka-aine on kiteisenä, jauhattuna, liuksena tai prillattuna käytetty ammoniumnitraatti (AN). Myös natrium- ja kalsiumnitraattia käytetään räjähteissä. Räjähdysaineeseen voidaan lisätä alumiinia kasvattamaan räjähdyskaasujen määrää sekä räjähdyslämpötilaa. (Lappalainen ym. 2015, 183.)

Louhintaräjähdysaineet voidaan jakaa nitroglykoli- tai nitroglyseroli- (NG), emulsio-, Anfo- ja vesigeeliräjähdysaineisiin. Nitroglyserolia ja nitroglykolia sisältävillä räjähdysaineilla on korkea räjähdysteho ja ne ovat herkästi räjähtäviä. NG-räjähteet ovat paperipatrunoitua, muovikalvoon tai putkiin pakattuja, ja ne sopivat lähes kaikkiin räjäytystöihin. Emulsiot ovat olomuodoltaan juoksevia tai vaseliinimaisia räjähdysaineita, joiden etuja ovat muun muassa ominaisuuksien monipuolinen muokattavuus sopivaksi haluttuun käyttökohteeseen, lähes täydellinen ja puhdas palaminen sekä vedenkestävyys. Emulsiota on saatavilla sekä patruunoissa että pumpattavana bulkemulsioräjähdysaineena. Anfo (ANO) -räjähdysaineet puolestaan ovat ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seoksia, jotka toimitetaan louhintatyömaille joko sekoitusautolla tai säkkitavarana. Anfo on turvallinen ja räjähdysaineista edullisin vaihtoehto. Sen heikkouksia ovat kuitenkin huono vedenkestävyys, pieni tiheys ja siten heikko

kallion irrotustehokkuus sekä huono räjähdysvarmuus pienissä rei'issä. Vesigeeliräjähdysaineet eli slurryt sisältävät aina geelimäisen sidosaineen, jonka tarkoituksena on estää muiden ainesosien kuten TNT:n, ammoniumnitraatin tai alumiinin erkautuminen toisistaan. Slurry on kehitetty kosteisiin olosuhteisiin ja suurteikäräjäytyksiin, ja sitä voidaan panostaa joko panostusautosta pumppaamalla tai muovipusseihin pakattuna. (Vuolio & Halonen 2010, 58-59.)

Räjähdyspanosten turvalliseen ja oikea-aikaiseen sytytykseen käytetään eri käyttötarkoitukseen soveltuvia sytytysvälineitä. Yleisimpiä käytössä olevia sytytysvälineitä ovat sähköräjäytysnallit, impulssiletkuräjähdysnallit, räjähtävä tulilanka ja elektroniset räjäytysnallit. Nykyään harvemmin käytettäviä sytytysvälineitä ovat aikatulilanka sekä aikatulilankanalli. (Lappalainen ym. 2015, 184.)

Sähkönalleissa sähkövirta johdetaan sytytysjohtoja pitkin sytykepäähän, joka sytyttää hidaste-elementin välityksellä nallin pohjapanoksen. Sähkönalleista avolouhinnassa käytetään hidastusaikavälin perusteella jaoteltuna L-nalleja eli lyhythidastenalleja, joissa Suomessa yleisesti käytetty aikaväli on 25 millisekuntia. L-nallit mahdollistavat pengerlouhinnassa vierekkäisten ja peräkkäisten reikien räjähtämisen riittävän lyhyin aikavälein. (Vuolio & Halonen 2010, 80-81.)

Impulssiletkuräjäytysnallien käyttö sytytysjärjestelmänä vastaa hyvin paljon sytytystä hidasteisilla sähkönalleilla. Impulssiletkuräjäytysnalli on alun perin kehitetty tilanteisiin, jossa sähkönalleilla on riski syttyä tahattomasti. Impulssiletku on muoviletkua, jonka sisäpinnalla on hienojakoista räjähdysainetta, oktogeenia. Se vaatii palamisreaktion aikaansaamiseksi räjähdysketjun, joka toteutetaan esimerkiksi pietsokipinään perustuvalla sytytyslaitteella, räjähtävällä tulilangalla tai räjäytysnallilla. Shokkiaalto etenee impulssiletkun sisällä noin 2100 m/s ja sytyttää toisessa päässä olevan nallin. Impulssiletkunallien kytkemiseen käytetään erillisiä pienoisenallin sisältäviä kytkentäkappaleita, jotka voivat sisältää myös hidasteen. (Lappalainen ym. 2015, 186-187; Vuolio & Halonen 2010, 85-86.)

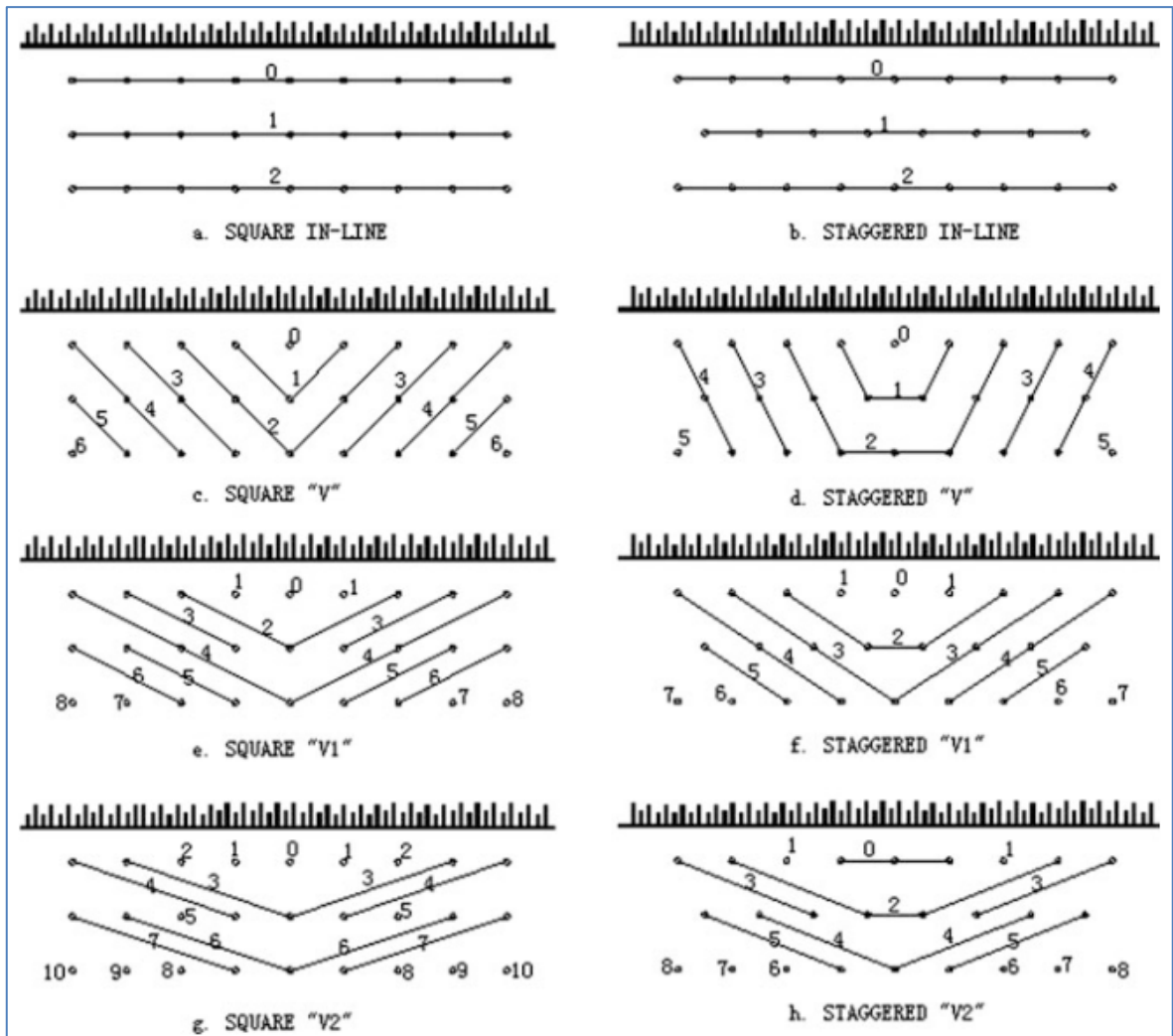
Räjähtävää tulilankaa käytetään pengerlouhinnassa pääosin erikoistapauksissa sekä yleisesti tarkkuuslouhinnassa. Räjähtävä tulilanka koostuu vedenpitävästä muoviletkusta, jonka sisällä on nallilla syttyvää räjähdysainetta, pentriittiä. Suomessa yleisesti käytettävät räjähtävät tulilangat sisältävät pentriittiä 5-10 grammaa/metri, ja tulilangan räjähdysnopeus on noin 6000-7000 m/s. Tulilangan räjähtäessä se sytyttää muut siihen kosketuksissa olevat räjähdysaineet lukuun ottamatta bulkemulsioita ja vesigeelejä. (Vuolio & Halonen 2010, 77.)

Elektronisessa nallissa hidasteena toimii nallin sisällä oleva mikropiiri. Nallin mikropiiri on elektroninen kello, joka mahdollistaa merkittävästi tarkemman syttymisajankohdan kuin pyroteknisestä massasta tehdyillä hidasteilla, joissa sytytyksen aikahajonta on suuri. Ohjelmointiyksiköllä voidaan asettaa nalleille yksilölliset hidasteajat sekä tarkastaa räjäytyskenttä ja korjata siinä mahdollisesti ilmenneet viat. Nallit kytketään liitäntäjohtoilla runkojohtoon, ja tarvittava syttymisenergia nalleille annetaan erillisellä sytytyslaitteella. (Vuolio & Halonen 2010, 91-92.)



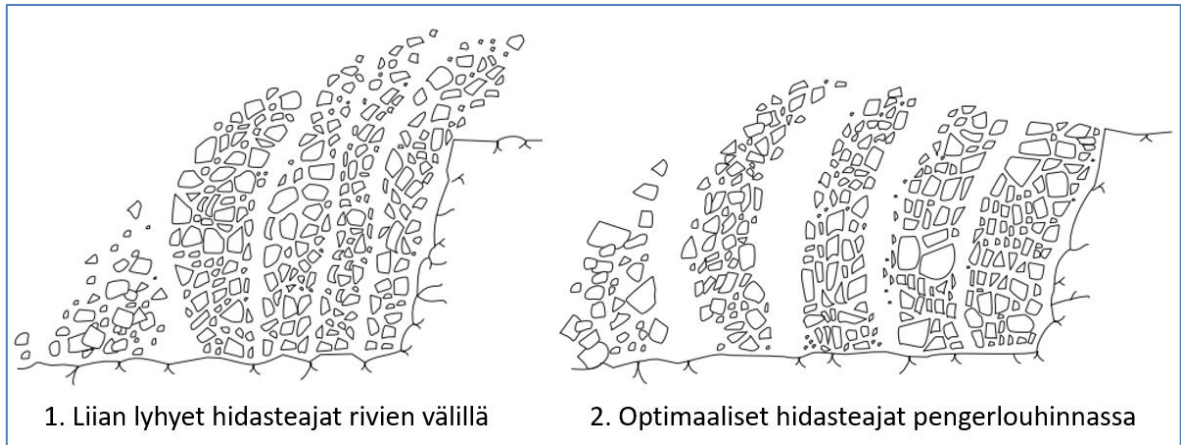
### 2.1.4 Reikien sijoittelu ja sytytysjärjestys

Pengerlouhinta toteutetaan yleensä moniriviräjäytyksenä, jossa porausreikien sijoitteluun ja sytytysjärjestykseen on monia erilaisia variaatioita. Useimmiten reiät sijoitetaan louhittavalle alueelle neliön tai suorakaiteen muotoiseen ruudukkoon tai lomittain peräkkäisten rivien välillä. Moniriviräjäytyksen yksinkertaisin sytytysjärjestelmä on sijoittaa porareivät nelikulmion muotoon ja sytyttää reiät riveittäin käyttäen yhtä hidastenumeroa reikärivien kohden. Myös erilaiset aurasmenetelmät ovat yleisesti käytössä. Kuvassa 3 on esitetty erilaisia sytytysjärjestelmävariaatioita sekä neliön muotoon että lomittain sijoitetuille rei'ille. Vaihtoehtoisissa a. ja b. reiät sytyvät rivi kerrallaan, kun taas vaihtoehdot c-h. kuvaavat aurasmenetelmiä. (Zou 2017, 295; Vuolio & Halonen 2010, 144.)



Kuva 3. Esimerkkejä sytytysjärjestystävaihtoista neliön muotoiseen kuvioon (Square) ja lomittain (Staggered) sijoitetuille rei'ille. Numerot kuvaavat sytytysjärjestystä. (Zou 2017, 304.)

Pengerlouhintaräjäytyksissä käytetään yleisesti lyhyitä hidasteaikoja. Reikien ja rivien väliset hidasteajat tulee olla kuitenkin riittävän pitkiä, jotta räjäytetyn rivin kalliomassat ehtivät lähteä liikkeelle ennen seuraavan rivin räjäytystä. Jos hidasteajat ovat liian lyhyitä, taaeman rivin kalliomassoille ei ole tilaa purkautua ja heittosuunta muuttuu vaakatasosta pystysuuntaan (kuva 4). Toisaalta liian pitkät hidasteajat saattavat lisätä kivien sinkoilua, paineaaltoa ja heikentää lohkaroitumista, sillä räjähtävän rivin kalliomassoilla ei ole edessään edeltävän rivin purkautuvia massoja suojanaan. (Persson 1994, 251; Oloffson 119, 103.)



Kuva 4. Vasemmalla esitetty liian lyhyiden rivien välisten hidasteaikojen vaikutus louheen heittosuuntaan. Oikealla räjäytetyn louheen oikeanlainen purkautuminen käyttäen sopivia hidasteaikoja.

### 2.1.5 Kentän panostus ja täkkäys

Ennen porausreikien panostusta on panostajan tarkastettava, etteivät reiät ole väärän syvyiset tai tukkeutuneet. Tukkeutuneita reikiä voidaan yrittää avata kepillä tai tangolla hakkaamalla, ja reiän pohjalle pudonneet pienemmät irtokivet sekä poraussoija voidaan paineilman avulla puhalttaa pois reiästä. Mikäli porausreikä on liian pitkä, voidaan sitä lyhentää lisäämällä reiän pohjalle kerros sepeliä. Liian lyhyet porausreiät syvennetään poraamalla. (Olofsson 1997, 189)

Reikien panostukseen käytetään joko patruonoituja tai irrallisia räjähdysaineita. Patrunoidut räjähdysaineet pudotetaan reikiin ja tiivistetään puisella panostuskepillä. Irralliset räjähdysaineet panostetaan kaatamalla, paineilman avulla tai pumpaamalla. Irrallisilla räjähdysaineilla panostettaessa pohjapanoksena ja räjäyttimenä käytetään patruonoituja räjähdysaineita. (Vuolio & Halonen 2010, 173, 175.)

Räjäytyksessä irrotettavan kalliomassan liikettä sekä kivien sinkoilua voidaan vähentää peittämällä eli täkkäämällä räjäytyskenttä energiaa absorboivalla peitteellä. Yleensä peitteenä käytetään käytetyistä traktorinrenkaista ja teräsvaijerista punottuja täkkäysmattoja. Täkkäys on tehokkaimmillaan pienissä louhintakentissä, kun peitemateriaalin massa on likimain samansuuruinen kuin räjäytettävän kiviaineksen. Kalliomassan eteenpäin suuntautuvaa liikettä voidaan pienentää myös louhetäkkäyksellä eli jättämällä osa edeltävän räjäytyksen louheesta kasalle louhittavan rintauksen eteen. (Olofsson 1997, 114-115.)

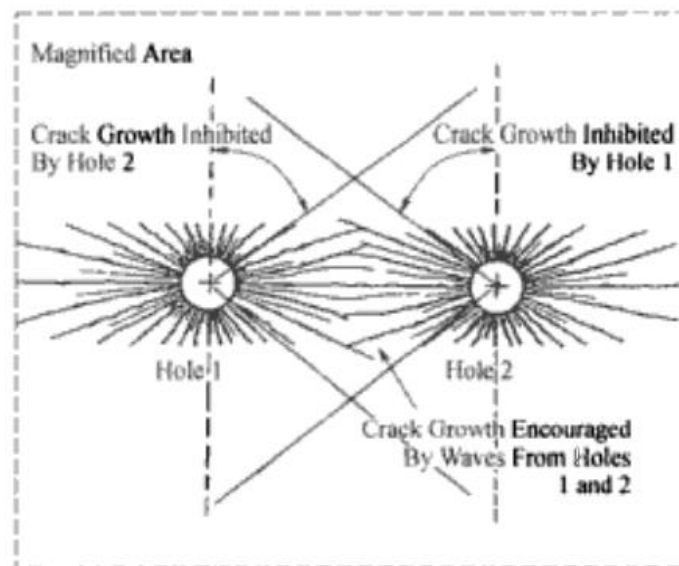
## 2.2 Tarkkuuslouhinta

### 2.2.1 Johdanto tarkkuuslouhintamenetelmiin

Tarkkuuslouhinnassa tavoitteena on louhia kallioon suunniteltu tila tiettyjen toleranssien tarkkuudella sekä muodostaa sileät ja rakoilemattomat pinnat kallioon. Tarkkuuslouhinnan etuja avolouhinnassa ovat muun muassa pienempi putoavien kivien riski leikkauksissa, pienempi tarvittava betonimäärä suoraan kalliopintaa vasten valettaessa sekä kalliorakenteen pidempi turvallinen käyttöikä ja vähentynyt kunnossapitotarve. (Vuolio & Halonen 2010, 261-262). Tarkkuuslouhinnan menetelmistä on olemassa lukuisia variaatioita, ja kaikkia niitä yhdistää pyrkimys jännitysten ja kallion rakoilun minimoimiseen teoreettisen louhintalinjan ulkopuolella (Olofsson 1997, 174).

Sileä kalliopinta tuotetaan pääasiallisesti räjäyttämällä samanaikaisesti lähekkäin toisiaan sijaitsevia reikiä, jolloin reikien välille aiheutuu toisiaan kohtaavia paineaaltoja rikkoen kiiveä ja muodostaen raon tai halkeaman. Louhinnassa jäljelle jäävän kallioseinämän pitämiseksi mahdollisimman ehyenä, vaaditaan muodostettavan raon suuntaisissa reunarei'issä irrotuslouhintaa tiheämpää ja huolellisempaa porausta sekä erityisratkaisuja panostuksessa. Reunarei'issä käytetään irrotuslouhintaan verrattuna suhteellisen pientä panostustiheyttä, ja panosten sytytyksessä pyritään räjäyttämään reunareiät samalla hetkellä tai 1-2 ms viiveellä reikien välillä. (Vuolio & Halonen 2010, 261-262, 269.)

Kahden lähekkäin toisiaan sijaitsevan ja samalla ajanhetkellä räjäytetyn reiän väliin muodostuvien rakojen syntymismekanismin on kehitelty vuosien saatossa useita erilaisia teorioita. Yksi klassisista rakojen syntymismekanismien teorioista perustuu kahden toisiaan lähellä olevien reikien jännitysaaltojen yhteisvaikutukseen. Porausreiän räjäytyksessä syntyvällä iskuaallolla on kaksi jännityskomponenttia; radiaalinen ja tangentialinen. Radiaalinen komponentti on puristusjännitystä iskuaallon työntäessä kalliota ulospäin räjäytetyn porarein sijainnista. Tangentialinen komponentti sen sijaan on vetojännitystä venyttäen kalliota iskuaallon kulkiessa poispäin porareistä. Mikäli vierekkäiset reiät on räjäytetty täsmälleen samalla ajanhetkellä, vaikuttaa ympäröiviin kallioalueisiin yhtäaikaisesti molempien reikien räjäytyksessä syntyneet iskuaallot. Kuvassa 5 on havainnollistettu kahden vierekkäisen reiän iskuaaltojen yhteisvaikutusta ympäröivään kallioon. Reiän 1 iskuaallon radiaalinen komponentti pyrkii puristuksen vaikutuksesta sulkemaan reiän 2 tarkkuuslouhintalinjaa kohtisuoraan suuntaan kasvavat halkeamat. Reiän 1 iskuaallon tangentialinen komponentti vuorostaan pyrkii edistämään reiän 2 räjäytyksestä muodostuvia tarkkuuslouhintalinjan suuntaisia halkeamia. Vastaavasti reiän 2 iskuaallolla on samanlaiset vaikutukset reistä 1 muodostuviin halkeamiin. Reikien väliin jäävä rakoillut vyöhyke muodostaa laajeneville räjähdyskaasuille helpoimman purkautumisreitit, mikä edelleen edesauttaa halkeamien muodostumista kyseisessä suunnassa. Reikien pitää sijaita suhteellisen lähellä toisiaan, jotta edellä mainittu ilmiö toteutuu. Jos reiät sijaitsevat kaukana vapaasta tilasta, ei takaisin heijastuvalla radiaalisella komponentilla (vetojännitys) ole juurikaan merkitystä. (Hustrulid 1999, 303-304.)



Kuva 5. Vierekkäin samanaikaisesti räjäytettävien reikien iskuaaltojen yhteisvaikutus ympäröivään kallioon (Hustrulid 1999, 305.)

Räjähdyksen vaikutuksesta ympäröivään kallioon syntyvien halkeamien pituuteen ja laajuuteen vaikuttavat panoksen suuruuden lisäksi se, miten porausreikä on täytetty räjähdysaineella. Ylipanostusta on vältettävä ja panoksen ympärille tulee jättää tilaa porausreiässä. (Vuolio & Halonen 2010, 262.) Panoksen ja porausreiän seinämän välinen vapaa tila pienentää räjähdyksessä syntyvän iskuaallon heilahdustaajuutta kalliossa sekä vähentää porausreiän seinämään kohdistuvaa räjähdyskaasun paineen suuruutta (Hustrulid 1999, 297).

Kallion geologisilla ominaisuuksilla, kuten kallion rakenteella ja lujuudella, on keskeinen vaikutus tarkkuuslouhinnan onnistumiseen ja menetelmän valintaan. Saman tarkkuuslouhintatekniikan ei siten voida olettaa tuottavan yhtä hyviä louhintatuloksia merkittävästi geologialtaan toisistaan poikkeavissa kalliomuodostumissa. Usein louhintakohteessa suoritetaan ensin varovaisia testilouhintoja vähemmän kriittisissä kohdissa oikean menetelmän ja sopivan reikävälin löytämiseksi. Tarkkuuslouhinnan suunnitelmia tulee myös jatkuvasti päivittää edellisten louhintatulosten analyysien perusteella. (Stiehr 2011, 871, 873.)

## 2.2.2 Raonräjäytys

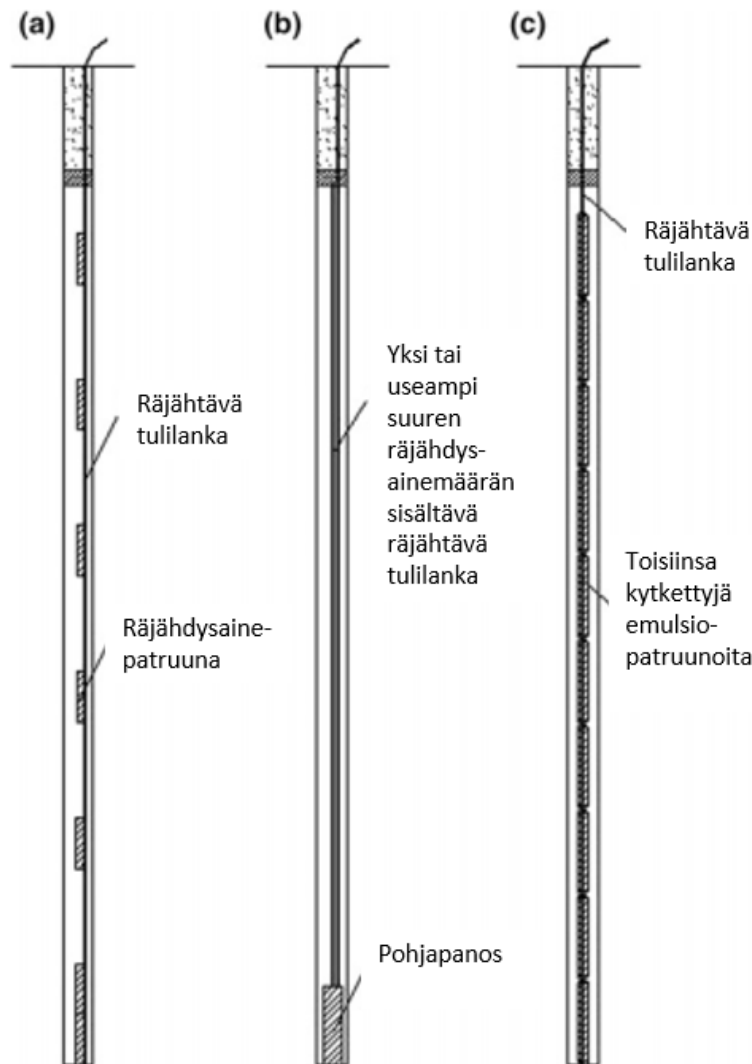
Raonräjäytysmenetelmässä räjäytetään kallioon rako tai halkeama suunnitellun kallioseinämän kohdalle ennen varsinaisten pengerialouhinnalla tai muulla vastaavalla menetelmällä louhittavien kalliomassojen irrotusta. Menetelmä vaatii tiheästi riviin porattuja yhdensuuntaisia reikiä, jotka panostetaan kevyesti ja räjäytetään yhdenaikaisesti. Rakoreiät voidaan räjäyttää joko omana räjäytyksenään tai samassa räjäytyksessä kenttäreikien kanssa. Reikien välille muodostuvan raon tehtävänä on suojella räjäytyskentän takana olevaa kalliota irrotuslouhinnan vaikutuksilta. (Hustrulid 1999, 303; Vuolio & Halonen 2010, 269.)

Raonräjäytyksen porausreikien halkaisija vaihtelee yleensä välillä 51-101 mm. Raonräjäytyksessä reikäväli ei saa olla liian suuri, sillä haluttua rakoa reikien välille ei välttämättä tällöin muodostu. Liian pieni reikäväli sen sijaan saattaa aiheuttaa ylilouhintaa kallioseinämässä. (Stiehr 2011, 881, 883.) Tyypillinen reikävälin arvo vaihtelee välillä 8-16 kertaa reiän halkaisija (Tose 2006, 532).

Tarkkuuslouhintalinjan reikien porauksessa vaaditaan suurta tarkkuutta raonräjäytyksen parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Jos reikien välillä on liian suurta poikkeamaa eivätkä reiät muodosta yhtenäistä tasoa, voi rako jäädä muodostumatta joko osittain tai kokonaan. Jo 150 mm suuruiset poikkeamat porattujen reikien ja reikärivin muodostaman kuvitteellisen tason välillä on havaittu heikentävän tarkkuuslouhintatulosta. Mikäli reikä poikkeaa sijainnistaan tarkkuuslouhittavan pinnan suuntaisesti, kallio todennäköisesti rikkoontuu enemmän reiän ympäriltä, jolloin räjähdyskaasujen paine saattaa purkaantua ympäröivään kalliomassaan heikentäen raonräjäytyksen tehoa. Raonräjäytyksen reikäpituuden rajoitteena on porauksen tarkkuus. Maksimipituus rei'ille on yleensä 15-25 metriä, sillä pitemmissä rei'issä poraustarkkuus heikkenee merkittävästi. (Eades & Perry 2018, 102; Tose 2006, 530.)

Raonräjäytyksessä reiän pohjaosan suurempaa panostusastetta lukuun ottamatta varsipanostulisi olla mahdollisimman yhtenäinen ja jatkuva tarjoten samanlaisen panostusasteen reiässä (Tose 2006, 532). Reikien panostukseen on olemassa useita kyseiseen käyttötarkoitukseen suunniteltuja tuotteita, kuten räjähtävällä tulilangalla toisiinsa kytkettyjä emulsio- ja vesigeelipatruunoita sekä dynamiitti- ja emulsioputkipanoksia, jotka on varustettu erillisellä liitoskappaleella tai putkipanoksen pään laajennuksella mahdollistaen panosten liittämisen

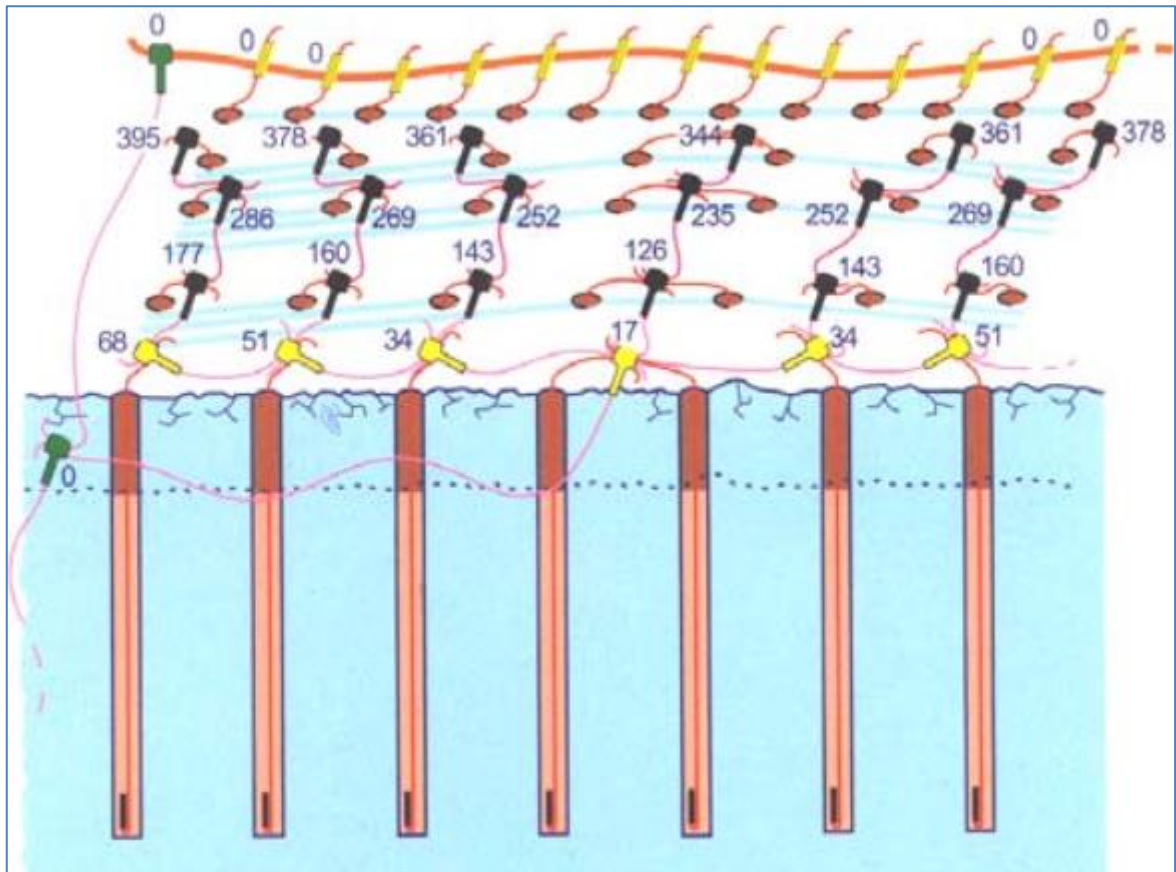
toisiinsa yksinkertaisesti ja nopeasti. Riittävän suuren räjähdysainemäärän sisältävää räjähtävää tulilankaa voidaan myös yksinään käyttää reikien panostukseen. (Stiehr 2011, 880.) Esimerkkejä raonräjäytysreikien panostustekniikoista on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6. Esimerkkejä raonräjäytysreikien panostuksesta; (a) räjähtävään tulilankaan tasavälein sidotut yksittäiset räjähdysainepatruunat, (b) räjähtävää tulilankaa yhdessä pohjapanoksen kanssa, (c) erityisesti tarkkuuslouhintaan suunnitellut räjähtävällä tulilangalla toisiinsa kytketyt emulsiopatruunat. (Zou 2017, 334.)**

Panosten sytytyksessä käytetään yleensä räjähtävää tulilankaa, joka mahdollistaa vierekkäisten porareikien syttymisen lähes täysin samanaikaisesti. Samanaikainen syttyminen kasvattaa osaltaan räjäytyksen aiheuttamia värinöitä, ja värinäherkissä kohteissa sytytykseen soveltuikin paremmin elektroniset nallit, joiden avulla vierekkäiset reiät saadaan räjähtämään tarkasti esimerkiksi 1-2 ms aikavälillä hilliten värinöiden syntymistä. Lyhyt- ja pitkähidastenalit sen sijaan eivät sovellu tarkkuuslouhintaan, sillä pyroteknisten hidasteiden paloaikojen hajonnan vuoksi nalleja ei voida valmistaa aivan tarkalleen tietyllä ajanhetkellä syttyviksi. Nallien paloaikojen hajonta voi aiheuttaa sen, että ensin syttyvä reikäpanos saattaa ehtiä katkaisemaan viereisen myöhempana ajankohtana syttyvän reikäpanoksen räjähdysvälityksen. (Vuolio & Halonen 2010, 267.)

Kuvassa 7 on havainnollistettu pengerialouhinnan kenttäreikien räjäytyksen yhteydessä suoritettavaa raonräjäytystä, missä taaimmaisen tiheällä reikävälillä poratun raonräjäytysrivin sytytykseen käytetään räjähtävää tulilankaa ja pengerialouhinnan kenttäreikien sytytykseen impulssiletkunalle yhdessä pintahidastimien kanssa. Sytytys johdetaan sytytyslaitteelta sekä raonräjäytysrivin selkälankaan että kenttäreikien pintahidastimiin impulssiletkun avulla. Kaikki esiraon reiät räjähtävät samalla ajanhetkellä ennen kenttäreikiä. Kaksi ensimmäisen kenttäreikärivin reikää räjähtävät 17 millisekunnin kuluttua raonräjäytyksestä, ja sytytys etenee pintahidastimien välityksellä niin, että viimeinen kenttäreikä syttyy 395 millisekunnin päästä räjäytyksen aloitushetkestä.



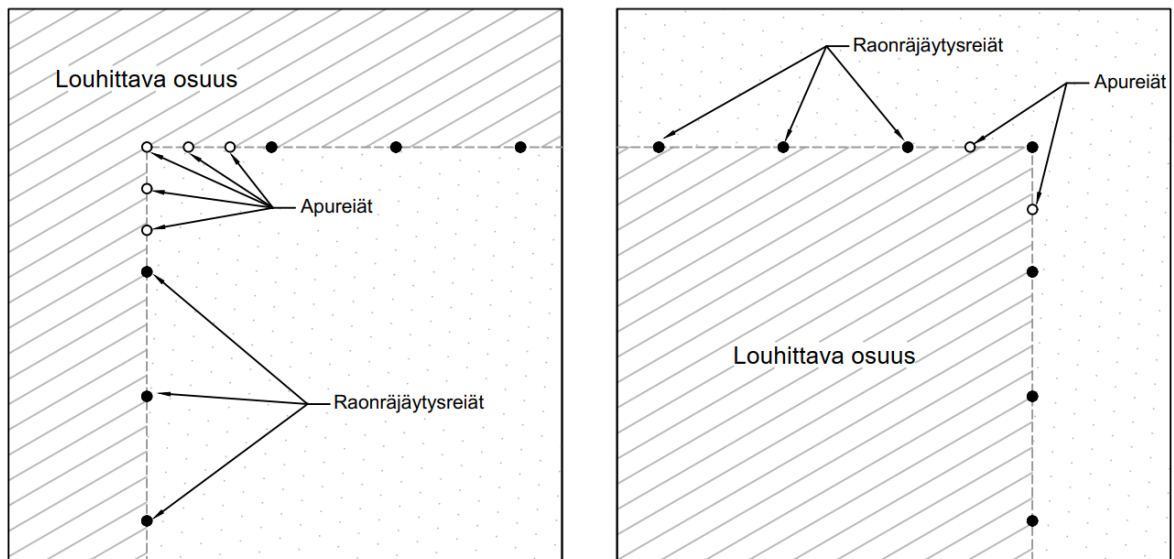
Kuva 7. Raonräjäytys kenttäreikien louhinnan yhteydessä. Taaimmaiset rakoreiät sytytetään räjähtävällä tulilangalla, jonka jälkeen kenttäreiät sytytetään impulssiletkunallien ja pintahidastimien avulla. (Nonel – käyttäjän opas.)

Mikäli raonräjäytyksestä aiheutuvaa voimakasta ääntä halutaan hillitä, voidaan rei'issä käyttää etutäytettä. Etutäytteen käytöllä on kuitenkin taipumus lohkaista kalliota reiän yläosasta aiheuttaen ryöstöä tarkkuuslouhitun kalliopenkereen harjaan. Etutäytesepelin valuminen reiän pohjalle on ehkäistävä tukkimalla reikä halutulta tasolta esimerkiksi jarrujousella ennen etutäytteen lisäämistä. (Tose 2006, 530.)

Heikoissa ja pehmeissä kivilajeissa raonräjäytyksen lopputulosta voidaan yrittää parantaa apureikien (guide holes) avulla. Apureiät ovat panostamattomia porausreikiä, jotka sijoitetaan raonräjäytysreikien välille edistämään ja ohjaamaan rakojen muodostumista halutun tarkkuuslouhintalinjan suuntaan. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi ohjaamaan raon muodostumista tarkkuuslouhintalinjan nurkissa (kuva 8) ja ehkäisemään siten ylilouhinnan muodostumista.



tumista. Apureikiä hyödyntämällä ei voida kuitenkaan kasvattaa raonräjäytysreikien reikäväliä, sillä tyhjä apureiät saattavat katkaista rakojen muodostumisen raonräjäytysreikien välillä. (Heiniö 1999, 192; Stiehr 2011, 883.)



Kuva 8. Esimerkki apureikien sijoittelusta tarkkuuslouhintalinjan nurkissa.

Koska rako räjäytetään ennen varsinaisia louhintakentän kalliomassoja, ei paikallisia kallion ominaisuuksia tarkkuuslouhintalinjan sijainnissa voida etukäteen tarkasti määrittää. Raonräjäytyksen suunnittelu ja toteutus perustuvat siten vahvasti tehtyihin olettamuksiin. Mikäli raonräjäytys ei tuota riittävän hyvää lopputulosta, on suunnitelmia muutettava seuraaviin tarkkuuslouhintoihin. Raonräjäytyksen onnistumista voidaan kuitenkin arvioida kunnolla vasta, kun räjäytetty louhe on lastattu pois ja tarkkuuslouhittu seinämä on näkyvissä. Raonräjäytyksen suunnitelmia joudutaan siten päivittämään silloin, kun valmistaudutaan jo seuraavaan räjäytykseen. (Eades & Perry 2018, 102.)

### 2.2.3 Jälkilouhinta

Jälkilouhintamenetelmässä pääkalliomassojen irrotuksen jälkeen louhitaan halutun kallioseinämän kohdalle rako, jolloin muodostuu vapaaseen tilaan purkautumaan pääsevä vyöhyke. Vyöhykkeen paksuuteen vaikuttaa muun muassa louhintatapa ja kohteen laajuus sekä laatu. (Vuolio & Halonen 2010, 269.)

Jälkilouhinta muistuttaa panostukseltaan ja sytytykseltään hyvin paljon raonräjäytystä, mutta merkittävimpana erona on jälkilouhinnan suoritus vasta kenttäreikien räjäytyksen jälkeen, päinvastoin kuin raonräjäytyksessä. Jälkilouhinnassa voidaan tosin käyttää suurempaa reikäväliä kuin raonräjäytyksessä, mikä vähentää porauksesta ja räjähdysaineista koituvia kustannuksia. (Zou 2017, 326; Stiehr 2011, 886.)

Jälkilouhinnassa heikkoutena on, että rikkonaisessa kalliossa reunalinjalle mahdollisesti jo poratut reiät voivat tukkeutua tai reikien poraus vaikeutuu kallion repeytyneisyyden vuoksi. Lisäksi räjäytys, kuormaus ja mahdollisesti rusnaus joudutaan suorittamaan kahteen kertaan, toisin kuin raonräjäytysmenetelmää käytettäessä. (Vuolio & Halonen 2010, 269.)

## 2.2.4 Rakolinjaporaus

Rakolinjaporausmenetelmässä tarkkuuslouhittava pinta tuotetaan poraamalla hyvin tiheällä reikävälillä rivi porausreikiä. Tiheään porattu reikärivi toimii keinotekoisena heikkousvyöhykkeenä, joka rajoittaa kenttäreikien räjäytyksestä syntyvän rakoiluvyöhykkeen laajenemista ja vähentää siten ylilouhinnan määrää. Rakolinjaporausmenetelmässä ei käytetä yleensä lainkaan räjähdysainetta. Mikäli räjähdysaineella halutaan edesauttaa kallion rikoutumista reikien välillä, käytetään rei'issä hyvin kevyttä panostusta. Kevyt panostus voidaan toteuttaa esimerkiksi sijoittamalla reikiin ainoastaan räjähtävää tulilankaa. (Hustrulid 1999, 302.)

Rakolinjaporausksessa käytetään yleisesti 38-76 mm reikäkokoa ja reikävälin ohjeellinen suuruus on 2-4 kertaa reiän halkaisija. Kenttäreikien viimeisen rivin etua ja reikäväliä pienennetään yleensä 50-75 %, ja kyseisten reikien panostusaste on tyypillisesti puolet muiden kenttäreikien panostusasteesta. (Stiehr 2011, 892.)

Poraustarkkuus on hyvin kriittinen tekijä rakolinjaporausmenetelmän onnistumisessa. Reikien on sijaittava täsmällisesti vierekkäin ja yhdensuuntaisesti muodostaen tason, joka edustaa louhinnan jälkeistä toteutunutta kallioseinämää. Rakolinjaporausella on mahdollista saavuttaa muita tarkkuuslouhintamenetelmiä parempi lopputulos louhitulle seinämälle. Menetelmän suuri porausmäärä ja siitä aiheutuvat kustannukset kuitenkin rajoittavat menetelmän käyttöä. (Hustrulid 1999, 302.)

Rakolinjaporausksessa paras lopputulos saadaan homogeenisessä ja vain vähän rakoilevassa kalliossa, tai reikärivin ollessa porattu pääarakopinnan suuntaisesti. Rakolinjaporaususta voidaan käyttää myös yhdessä esiraon kanssa, jolloin louhintakentän kulmissa käytetään rakolinjaporaususta ja loppuosa kentän ulkoreunasta räjäytetään esiraonräjäytyksenä. (Tose 2006, 529.)



## 3 Kalliopenkereiden geometrian mittaus avolouhinnassa

### 3.1 Mittaustekniikat

#### 3.1.1 Satelliittipaikannus

Yksittäisten mittauspisteiden tasosijaintien (x- ja y-koordinaatit) ja korkeuksien (z-koordinaatti) mittaamiseen voidaan käyttää satelliittipaikanninta. Satelliittipaikannin koostuu kartoitussauvan päähän asennettavasta satelliittivastaanottimesta sekä mittausohjelmistot sisältävästä maastotallentimesta. Kartoitussauvat sisältävät usein tasaimen, jonka avulla satelliittipaikantimen asento pidetään mittaushetkellä pystysuorassa. (Laurila 2012, 18-19.)

Satelliittimittauksessa paikannus perustuu etäisyyksien ja etäisyyserojen mittaamiseen. Satelliitin lähettämien signaalien paikannuskoodeja tai kantoaaltoja hyödyntämällä voidaan laskea havainnoitsijan ja satelliitin välinen etäisyys. Satelliitin paikan määrittäminen perustuu sen lähettämiin ratatietoihin sekä tarkkaan ajan mittaamiseen. Kun etäisyydet vähintään kolmeen satelliittiin ja kyseisten satelliittien sijainnit tunnetaan havaintohetkellä, voidaan mittauspaikan sijainti laskea. Mittausvirheiden hallinnan vuoksi tulisi etäisyydet mitata vähintään neljään satelliittiin. (Laurila 2012, 291-292, 306.)

Satelliittipaikannuksessa on mahdollista käyttää useita eri mittaustapoja, joiden jaottelu perustuu muun muassa havaintolaitteiden lukumääriin, systemaattisten virheiden korjaamistekniikoihin ja mittauksissa käytettäviin havaintosuureisiin. Perusmittaustapoja ovat satelliittien lähettämien signaalien paikannuskoodeja hyödyntävät absoluuttinen paikannus ja differentiaalinen paikannus sekä satelliittien kantoaaltojen vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus. Absoluuttinen paikannus eli navigointi (GPS, GNSS) on yleisimmin käytetty peruspaikannusmenetelmä ja sen avulla päästään noin 5-10 metrin paikannustarkkuuteen. Differentiaalisessa paikannuksessa (DGPS, DGNSS) tunnetulla pisteellä sijaitsevan tukiaseman avulla voidaan korjata mittauksen tiettyjä systemaattisia virheitä, jolloin paikannustarkkuus on noin 0,5-5 metriä. Interferometrinen mittaus eli vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus on edellä mainituista perusmittausmenetelmistä tarkin, ja sen avulla on mahdollista päästä parhaimmillaan jopa muutamien millimetrien paikannustarkkuuteen. Vaihehavaintoihin perustuvaa suhteellisesta mittauksesta käytetäänkin yleensä suurta tarkkuutta vaativissa mittauksissa, kuten geodesiassa, kartoitusmittauksissa sekä rakentamisen mittauksissa ja koneohjauksessa. (Laurila 2012, 293-294.)

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK) on kartoitus- ja merkintämittauksissa yleisesti käytetty menetelmä. Perinteisessä RTK-mittauksessa tunnetulla pisteellä sijaitseva tukiasema toimii vertailuvastaanottimena, joka lähettää mittaamansa kantoaaltojen vaihehavainnot tiedonsiirtoyhteyden avulla paikantavalle vastaanottimelle. Paikantava vastaanotin ratkaisee molempien vastaanottimien mittaamien havaintosuureiden perusteella alkutuntemattomat ja muut mittauksessa tarvittavat suureet sekä määrittää niiden perusteella sijaintinsa vertailuvastaanottimen suhteen. Paikantavalla vastaanottimella ja tukiasemalla tulisi olla seurannassa 6-7 yhteistä satelliittia, jotta mittauks tuloksen luotettavuus on riittävä. Perinteisen RTK-mittauksen sijaan voidaan käyttää verkko-RTK-mittauksesta, jossa hyödynnetään tukiasemien verkostoa. VRS (Virtual Reference Station) -järjestelmä on tukiasemaverkko-ratkaisu, jossa mittaajalle lasketaan virtuaalitukiasema eli kuvitteellinen tukiasemapiste. Erillinen laskentakeskus prosessoi useiden kiinteiden tukiasemien lähettämää dataa ja välittää virtuaalisen tukiaseman suhteen lasketun korjausdatan mittaajalle. (Laurila 2012, 319-322.)

### 3.1.2 Laserkeilaus

Laserkeilauksessa hyödynnetään lasersäteitä sekä tarkkoja etäisyys- ja kulmamittauksia mitattavien kohteiden havainnointiin. Kohteista saadut useat yksittäiset havainnot muutetaan kolmiulotteisiksi pisteiksi, joilla on jokaisella tietty x-, y- ja z-koordinaatti. Tämä kolmiulotteisten havaintopisteiden joukko muodostaa pistepilven, joka on yksityiskohtainen kuvaus mitattujen kohteiden geometriasta. (Alho ym. 2011, 117.)

Laserkeilain koostuu lasertykistä, keilainosasta sekä ilmaisinosasta. Lasertykki tuottaa lasersäteen, keilainosa poikkeuttaa lasersädettä ja ilmaisinosaa tulkitsee vastaanotetun signaalin. Mittaustieto tallentuu joko suoraan tietokoneelle tai keilaimen sisäiseen muistiin. (Cronvall ym. 2012, 10.)

Etäisyyden määrittämiseen laserkeilauksessa tyypillisesti käytetään joko laserpulssin kulke-  
man ajan mittaamiseen (time-of-flight) perustuvaa tekniikkaa tai lasersäteen vaihe-eron mit-  
taamista (phase shift) (Alho ym. 2011, 117). Laserpulssin kulkeman ajan määrittämiseen  
perustuvassa tekniikassa keilain lähettää pulssimaisia lasersäteitä mitattavaan kohteeseen,  
jotka heijastuvat takaisin keilaimen ilmaisinosaan. Valonnopeuden sekä laserpulssin lähet-  
tämisen ja heijastuneen paluusignaalin vastaanottamisen välillä kuluneen ajan perusteella  
voidaan laskea mittauspisteen ja keilaimen välinen etäisyys. (Kraus 2007, 400.) Vaihe-eroon  
perustuvassa mittauksessa keilain lähettää jatkuvaa ja moduloituja aallonpituuksia sisältävää  
lasersädettä mitattavaan kohteeseen. Lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen vaihe-ero  
mitataan, ja kokonaisten aaltojen lukumäärä keilaimen ja mitattavan kohteen välillä ratkais-  
taan. Mittauspisteen ja laserkeilaimen välinen etäisyys lasketaan vaihe-eron, etäisyysmit-  
taukseen käytetyn moduloidun aallonpituuden frekvenssin sekä lyhimmän moduloidun aal-  
lonpituuden avulla. (Alho ym. 2011, 117).

Maalaserkeilauksessa laserkeilain sijoitetaan yleensä staattisesti esimerkiksi kolmijalan va-  
raan pisteeseen, jonka sijainti on tunnettu tai erikseen kartoitettu. Keilaus suoritetaan yhdestä  
tai useammasta pisteestä riippuen mitattavasta kohteesta. Liikkuvassa maalaserkeilauksessa  
(mobiililaserkeilaus) keilaimeen yhdistetään GNSS-IMU-laitteisto (Global Navigation Sa-  
tellite System - Inertial Measurement Unit), jonka mahdollistaa mittaustieteen asentami-  
sen esimerkiksi reppuun, veneeseen tai autoon. Mobiililaserkeilauksella suurten mittausalu-  
eiden kartoittamisen onnistuu huomattavasti nopeammin kuin staattisella maalaserkeilauk-  
sella. (Alho ym. 2011, 116-117.)

GNSS-IMU-laitteistoa käytetään myös ilmalaserkeilauksessa, joka suoritetaan esimerkiksi  
helikopterista, lentokoneesta tai miehittämättömästä ilma-aluksesta (UAV, Unmanned Ae-  
rial Vehicle), kuten droonista. Satelliittipaikannuslaitteiston (GNSS) ja mittaustieteen  
asentoa seuraavan inertiajärjestelmän (IMU) tuottamien havaintojen avulla laitteiston kul-  
kureitti kolmiulotteisessa avaruudessa lasketaan joko reaaliaikaisesti tai jälkilaskentaproses-  
sissa. Jotta reittitieto voidaan laskea tarkasti, tarvitaan apuna myös GNSS-tukiasemaa. Tu-  
kiasema voi joko sijaita fyysisellä tunnetulla pisteellä tai voidaan käyttää VRS-palvelun tuot-  
tamaa virtuaalista tukiasemaa. Kyseisen niin kutsutun suorapaikannusmenetelmän ansiosta  
mittaustieteen orientointi voidaan suorittaa ilman erillisiä tukipisteitä. (Cronvall ym. 2012,  
13; Alho ym. 2011, 117.)

Mittauksen aikana näkyvyyttä heikentävä asiat kuten vesisade, lumi tai pöly vaikuttavat negatiivisesti mittaustulokseen, kuten myös mittaaminen valonlähdettä kohti. Mitattavan kohteen väri, muoto, pintamateriaali sekä asento suhteessa keilaimeen vaikuttavat lopputulokseen. Mikäli lasersäteet absorboituvat, poikkeutuvat tai heijastuvat ennenaikaisesti pois, saadaan mittauksesta osittain virheellisiä tuloksia. (Cronvall ym. 2012, 11.)

### 3.1.3 Takymetrimittaus

Takymetri on ensisijaisesti kulmien ja etäisyyksien mittaamiseen tarkoitettu koje, joka on kehitetty yhdistämällä teodoliitti sekä elektro-optinen etäisyysmittari. Vaaka- ja pystykulmien sekä etäisyyksien mittaushavainnot tallennetaan sähköiseen muotoon, ja havaintojen perusteella voidaan laskea koordinaatteja, korkeuksia sekä muita suureita. Kehittyneimmät takymetrit ovat pitkälle automatisoituja mittausrobotteja, jotka kykenevät kulmien ja etäisyyksien mittaamisen lisäksi myös keilaamaan ja valokuvaamaan mittauskohdetta. (Laurila 2012, 237-238.)

Takymetrin rakenteelliset pääosat ovat tasausalusta, runko-osa, elektro-optinen etäisyysmittari, mittauskaukoputki sekä alhidadi, joka yhdistää kaukoputken ja etäisyysmittarin runkoosaan mahdollistaen niiden pyörittämisen kojeen pysty- ja vaaka-akselien ympäri. Mittauskoje kiinnittyy runko-osan välityksellä tasausalustaan, jonka avulla takymetrin asentoa voidaan säätää. Takymetrin lisäksi kulmien ja etäisyyksien mittaamiseen käytetään tähyksiä ja prismoja, kartoitussauvoja sekä kolmijalkoja kojeen ja tähysten jalustoiksi. Takymetriin yhdistettävä tai siihen integroitu maastotallennin eli säänkestävä ja maastokelpoinen tietokone sisältää mittaushavainnot, ja siihen tallennetaan mittaushavainnot, mittaushavainnot sekä muut mittauksessa tarvittavat tiedot. (Laurila 2012, 239, 242, 244.)

Useimmissa nykyaikaisissa takymetreissä on mahdollisuus prismattomaan etäisyydenmittaukseen. Etäisyydenmittausmenetelmät perustuvat laserkeilauksen tapaan joko laserpulssein kulkuajan mittaamiseen tai lähtevän ja palaavan signaalin vaihe-eron mittaamiseen. (Wikman 2010, 19.) Useiden mittauksessa tuotettujen yksittäisten havaintopisteiden avulla voidaan muodostaa mitattavan kohteen geometriaa kuvaava pistepilviaineisto.

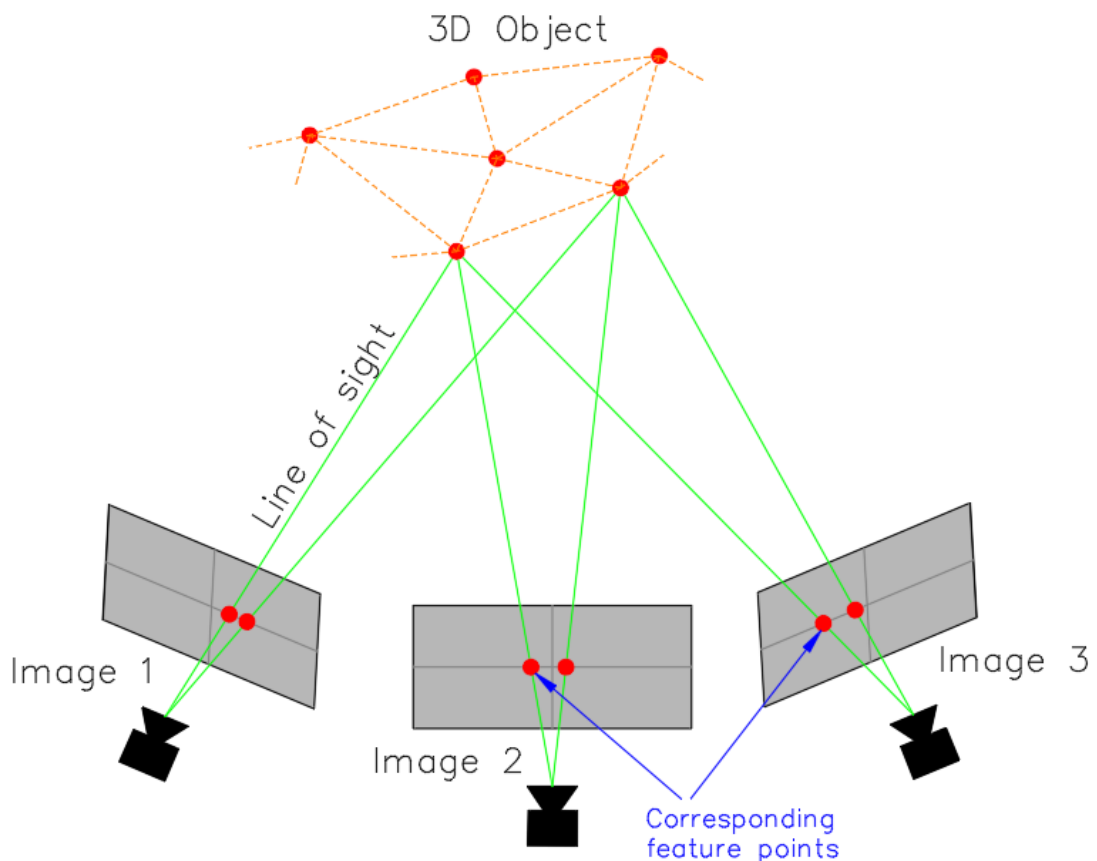
### 3.1.4 Fotogrammetriset menetelmät

Fotogrammetriaa eli kuvamittausta hyödyntävät menetelmät mahdollistavat objektien koon, muodon, orientaation sekä sijainnin määrittämisen kaksikulotteisista kuvista tehtyjen mittausten avulla. Fotogrammetristen analyysien tuloksia ovat esimerkiksi yksittäisten pisteiden koordinaatit kolmiulotteisessa koordinaattijärjestelmässä, topografiset kartat, ortokuvat sekä erilaiset digitaaliset geometriamallit. (Kraus 2007, 1; Fryer ym. 2007, 9.)

Fotogrammetriset tekniikat ovat riippuvaisia sensorin ja kuvantamisen tunnetusta geometriasta. Digitaalisessa fotogrammetriassa mittausinstrumenttina on digitaalikamera, jolla saadaan taltioitua kaksikulotteinen kuva näkymästä. Kun kuvia on kaksi tai useampia, voidaan kolmiulotteinen malli muodostaa kuvista tulkituista valonsäteiden leikkauspisteistä. Kameralla voidaan taltioida näkymästä ihmisenäköä vastaavat värisävyt. Normaali RGB-värikanavien lisäksi on olemassa kameroita, jotka tallentavat muita spektrikaistan alueita, kuten infrapuna- tai gammasäteilyä. (Rönnholm 2010, 8-9.)

Fotogrammetrisessä mittauksessa hyödynnetään keskusprojektiokuvausta, jossa kohdepiste, projektiokeskus ja kuvapiste ovat samalla suoralla. Kuvausetäisyys ja kameravakion suhde määrittelee keskusprojektion mittakaavan. Kuvausetäisyys on kuvattavan kohteen etäisyys projektiokeskuksesta. Kameravakio sen sijaan on kuvatason ja projektiokeskuksen välinen etäisyys, joka määritetään kalibroinnissa. Kameravakio on lukuarvoltaan lähellä objektiivin polttovälin arvoa. Kameravakiosta käytetään myös nimitystä kalibroitu polttoväli (cfl, calibrated focal length). (Salmenperä 2004, 21-22.)

SfM (Structure from Motion) on fotogrammetriamenetelmä, jossa erilaisten piirreirrotus- (feature extraction) ja 3D-rekonstruktioalgoritmien avulla useista toisiaan limittävistä digitaalisista valokuvista voidaan ratkaista kuvauksessa käytetyn kameras kuvaussijainnit ja orientaatiot sekä näkymän kolmiulotteinen geometria (kuva 9). (Westoby ym. 2012, 303.) SfM-menetelmää hyödyntävillä tietokoneohjelmistoilla suoritettavan prosessoinnin lopputuotteena on kuvista mitattu kolmiulotteinen pistepilviaineisto, joka on hyvin samankaltainen laserkeilauksella tuotetun aineiston kanssa. (Shervais 2015, 2.)



**Kuva 9.** Mittauskohteiden yksittäisten piirteiden tunnistaminen ja kameraparametrien määrittäminen useista toisiaan limittävistä valokuvista SfM-fotogrammetriamenetelmällä.

Kuva-aineiston prosessoinnissa tuotettavan aineiston ja kohdekoordinaatiston välinen yhteys määritetään georeferoinnilla. Kuvapisteen skaalataan ja orientoidaan haluttuun kohdekoordinaatistoon koordinaateiltaan tunnettujen tukipisteiden (GCP, ground control point) avulla. Tukipisteitä voivat olla esimerkiksi muodostetusta pistepilviaineistosta ja kuvatusta kohteesta havaitut piirteet, joiden koordinaatit voidaan käydä mittaamassa jälkikäteen. Yleensä tukipisteet ovat kuvauskohteeseen etukäteen sijoitettavia kuvista hyvin erottuvia signaaleja, joiden keskipisteiden koordinaatit mitataan ennen kuvauksen suorittamista. Ilmakuvien prosessoinnissa myös GNSS-IMU -tietoon perustuvalla suorageoreferoinnilla on mahdollista saavuttaa riittävä tarkkuus aineistolle. Yleensä kuitenkin muutamia tukipisteitä käytetään vähintään aineiston tarkkuustason varmistamiseen. (Honkavaara ym. 2011, 72; Westoby ym. 2012, 303.)

Fotogrammetriset menetelmät, kuten SfM-tekniikat, soveltuvat hyvin ilmakuvauksella kartoitetun kuva-aineiston prosessointiin. UAV-teknologioiden nopea kehittyminen on mahdollistanut kuvantamisen vaikeasti saavutettavissa maastoissa ja ympäristöissä sekä pienten kohteiden toistuvan kuvantamisen huomattavasti kustannustehokkaammin kuin perinteisillä lentokoneesta tai helikopterista suoritettavilla kuvauksilla. Nykyaikaisilla digitaalikameroilla 150 metrin lentokorkeudelta saavutetaan helposti noin 5 cm spatiaalinen resoluutio (Ground sample distance, GSD). (Salmirinne ym. 2017, 12; Honkavaara ym. 2011, 69.)

Sääolosuhteilla on suuri vaikutus ilmakuvauksen ja fotogrammetrian prosessoinnin onnistumiseen. Vesi- tai lumisateella kuvausta ei tule suorittaa, sillä kuvanlaatu kärsii ja sade voi pahimmillaan rikkoa kuvauskaluston. Kirkas auringonpaiste ei myöskään ole optimaalinen olosuhde kuvaukselle, sillä terävät ja tummat varjot ovat ongelmallisia fotogrammetriselle prosessoinnille ja erityisesti korkeuksien määrittämiselle. Otollisin olosuhde kuvaukselle on kirkas ja puolipilvinen sää. (Patikova 2004.)

### **3.2 Kalliopenkereiden geometriatiedon hyödyntäminen**

Kolmiulotteista mittausaineistoa voidaan avolouhinnassa hyödyntää esimerkiksi louhintojen suunnittelussa ja analysoinnissa, tilavuusmittauksissa, kallioseinämien stabiliteetin arvioinnissa, louhintatyön dokumentoinnissa sekä kaivoksilla avolouhoksen karttojen päivittämisessä. 3D-aineistot tarjoavat sekä tarkan informaation louhittavan kohteen geometriasta että yksityiskohtaisen kuvauksen kallion geologisista olosuhteista. (EFEE 2019.)

Kalliorintauksen geometrian mittaus on sekä louhinnan turvallisuuden että kallion lohkaroitumisen kannalta perusedellytys kunnolliseen louhintasuunniteluun ja tyydyttävän louhintatuloksen saavuttamiseen (Moser 2004, Moser ym. 2007). Kalliorintauksesta mitattu 3D-aineisto mahdollistaa kalliorintauksen geometrinen poikkeamien havaitsemisen ja niiden huomioonottamisen poraussuunnittelussa esimerkiksi muokkaamalla yksittäisten porareikien sijainteja ja kaltevuuksia. Aineistosta tehdyillä poikkileikkauksilla voidaan esimerkiksi huomioida todellinen etu eli lyhin etäisyys rintauksen ja tietyn porausreiän välillä. (Moser ym. 2007.)

Munaretti ym. (2013) tutkivat stereofotogrammetristen mittausten ja reikäsuoruuksmittausten hyödyntämistä räjäytystyön suunnittelussa Incopel-louhoksella Brasiliassa. Kalliorintauksesta kuvattiin käsivaraisesti järjestelmäkameralla useita kuvapareja. Stereokuvapareista muodostettiin fotogrammetrisella tietokoneohjelmistolla 3D-kuvia, jotka yhdistettiin yhdeksi 3D-malliksi. Lisäksi louhittavan kentän porausreiät kartoitettiin reikäsuoruuksmittauksella, ja mittaustiedot yhdistettiin fotogrammetrisin menetelmin tuotettuun 3D-malliin. 3D-

aineiston avulla saatiin tarkat parametrit louhintakentästä, kuten todellinen etu, reikäväli, ohiporaus sekä reikien kaltevuus ja sijaintipoikkeamat. Tutkimuksessa kalliopenkereen todellista etua visualisoitiin 3D-aineiston värikoodauksella (kuva 10). Mittauksista saatuja parametrejä käytettiin louhittavan kentän poraus- ja panostussuunnitteluun. (Munaretti ym. 2013.)



**Kuva 10.** Louhittavan kentän todellisen edun visualisointi värikoodauksella (Munaretti ym. 2013). Vihreä väri esittää kohtia kalliorintauksessa, jossa mitatun edun arvo on annettujen toleranssien sisällä.

Wiegand & Valentim (2016) vertailivat tutkimuksessaan kalliopenkereistä takymetrin kaltaisella lasermittaukseen perustuvalla laitteella mitattujen sekä UAV-laitteella kuvatuista kuvista muodostettujen pisteaineistojen käyttöä todellisen edun määrittämisessä louhintasuunnittelussa. Edun arvot määritettiin muodostamalla poikkileikkauksia TLC WinProf -ohjelmistolla. Eri mittausmenetelmillä saadut tulokset vastasivat hyvin toisiaan. UAV-laitteella onnistuttiin 20 minuutin mittausajanjaksona mittaamaan pituudeltaan yli 8-kertainen osuus kalliopengertä lasermittaukseen verrattuna. Mittaus UAV-laitteella todettiin siten nopeaksi ja hyväksi louhinnan suunnittelua tehostavaksi menetelmäksi. (Wiegand & Valentim 2016.)

Janič (2017) esittää artikkelissaan katsauksen avolouhoksen nykyaikaisiin mittaus- ja mallinnusmenetelmiin sekä esimerkkejä niiden hyödyntämiseen avolouhoksen teknologisten prosessien suunnittelussa. Mittausmenetelmistä työssä käsitellään maalaserkeilausta sekä fotogrammetrista mittausta UAV-laitteella. Louhoksen 3D-mallien hyödyntämismahdollisuuksista artikkelissa esitellään louhoksen itseohjautuviin kuljetusajoneuvoihin liittyvä suunnittelu Carlson Mining -suunnitteluohjelmistolla, panostus- ja räjäytystyön suunnittelu Orica SHOTPlus 5-ohjelmistolla sekä 3D-tulostetun pienoismallin käyttö visuaalisena apuna louhokseen liittyvissä suunnittelutöissä. (Janič 2017.)

Stewart & Wiseman (2017) esittävät artikkelissaan kokemuksia mittaustiedon hyödyntämisestä louhinnan optimoinnissa Georgiassa sijaitsevalla avolouhoksella. Projektissa kalliorintauksesta fotogrammetrisin menetelmin tuotettuja geometriatietoja ja reikäsuoritusmittauksia käytettiin louhinnan porauskaavioiden, ominaispanostuksen sekä porauksen tarkkuuden analysointiin. Mittausaineistosta tietokoneohjelmistolla muodostetuista poikkileikkauksista havaittiin merkittävää variaatiota kentän ensimmäisen reikärivin todellisessa edussa. Tulosten perusteella kalliorintauksien geometriaa päädyttiin mittaamaan ennen kenttäreikien porausta, ja poraus- sekä panostussuunnitelmat laadittiin rintauksien geometriatietoja hyödyntäen. Yksityiskohtaisten lähtötietojen ja tarkennetun suunnittelun havaittiin parantavan louhinnan turvallisuutta, jäljelle jäävän kalliorintauksen stabiiliteettia sekä tuottavan optimaalisemman lohkariekoon räjäytyksessä. (Stewart & Wiseman 2017.)



## 4 Tutkimuskohde

### 4.1 Kaapelinkulman kultakaivos

Kaapelinkulman kultakaivos on Dragon Mining Oy:n omistama Valkeakoskella sijaitseva avolouhos. Kaapelinkulman kultaesiintymä on löydetty vuonna 1986, jonka jälkeen alueella on suoritettu GTK:n, Outokumpu Oy:n sekä Dragon Mining Oy:n toimesta lukuisia tutkimuksia. Tutkimuksiin lukeutuvat muun muassa yhteensä 135 porakonekairausta, 231 timanttikairanäytettä sekä 80 RC-kairausta. (Dragon Mining 2019.)

Vuonna 2017 tehdyn arvion mukaan kaivoksen malmivarannot ovat noin 71 000 tonnia, ja malmin keskimääräinen kultapitoisuus on 4 g/tn. Kaivoksella ei ole omaa rikastamoaa, joten malmi on kuljetettava kuorma-autoilla noin 70 km päähän Vammalan rikastamolle.

Avolouhoksen suunniteltu läpimitta on noin 120 metriä, ja tavoitesyvyys 60 metriä. Louhintatyöt Kaapelinkulman kultakaivoksella aloitettiin keuhällä 2019. Ilmakuva kaivoksesta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Kaapelinkulman kaivos (kuvattu 7.8.2019).

## 4.2 Kaapelinkulman malmiesiintymä

Kaapelinkulma edustaa orogeenista kultaesiintymää paleoproterotsooisella Vammalan migmatiittivyöhykkeellä. Kultaesiintymä koostuu joukosta lähes samansuuntaisia malmijuonia tiiviissä ryhmässä kvartsidioriittimuodostumassa, joka sijaitsee tonaliittisen intruusion sisällä. (Dragon Mining 2019.)

Esiintymä on pituudeltaan noin 900 metriä, jossa mineralisoituneet vyöhykkeet kulkevat pohjois-koillisesta etelä-lounaaseen kaatuen loivalla kulmalla itään. Mineralisoituneiden vyöhykkeiden leveys vaihtelee senttimetreistä useisiin metreihin. (O. Pajula, henkilökohtainen tiedonanto, 8.5.2019.)

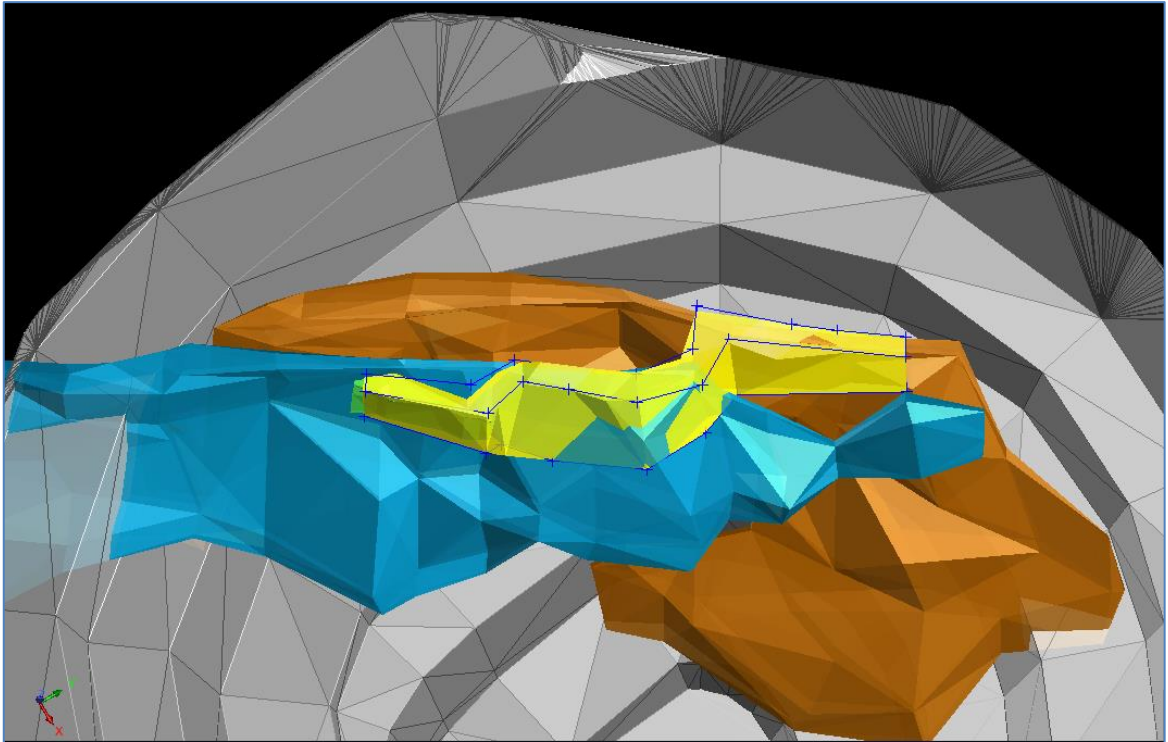
## 4.3 Louhinta kaivoksella

Kaapelinkulmalla tehokas malminlouhinta on haasteellista johtuen mineralisoituneiden vyöhykkeiden kapeudesta. Louhintatyö on suoritettava erityisellä tarkkuudella, jotta malmitappion ja sivukivilaimennuksen määrät pysyvät mahdollisimman vähäisinä. Malmivarantojen ollessa suhteellisen pienet, on malmitappion määrällä merkittävä vaikutus kaivoksen kannattavuuteen. Lisäksi sivukivilaimennus aiheuttaa pitkän malminkuljetusmatkan vuoksi tavanomaista suurempia kustannuksia.

Kaivoksen kairaustulosten perusteella geologi on muodostanut kolmiulotteiset mineralisaatiomallit, jotka kuvaavat mineralisoituneiden vyöhykkeiden sijainteja, muotoa, tilavuuksia sekä kultapitoisuutta tietyssä kohdin vyöhykettä. Kultapitoisuuksien perusteella mineralisaatiomalleista jalostetaan louhittavia malmiyksiköitä kuvaavat malmimallit. Kapeat, linssimäiset malmijuonet yhdistetään yhdeksi malmimalliksi, jos juonien välinen etäisyys toisistaan on alle metrin. Mikäli juonien välinen etäisyys on yli metrin, muodostetaan useampi malmimalli, ja malmien väliin jäävät sivukivikentät louhitaan omina yksikköinä.

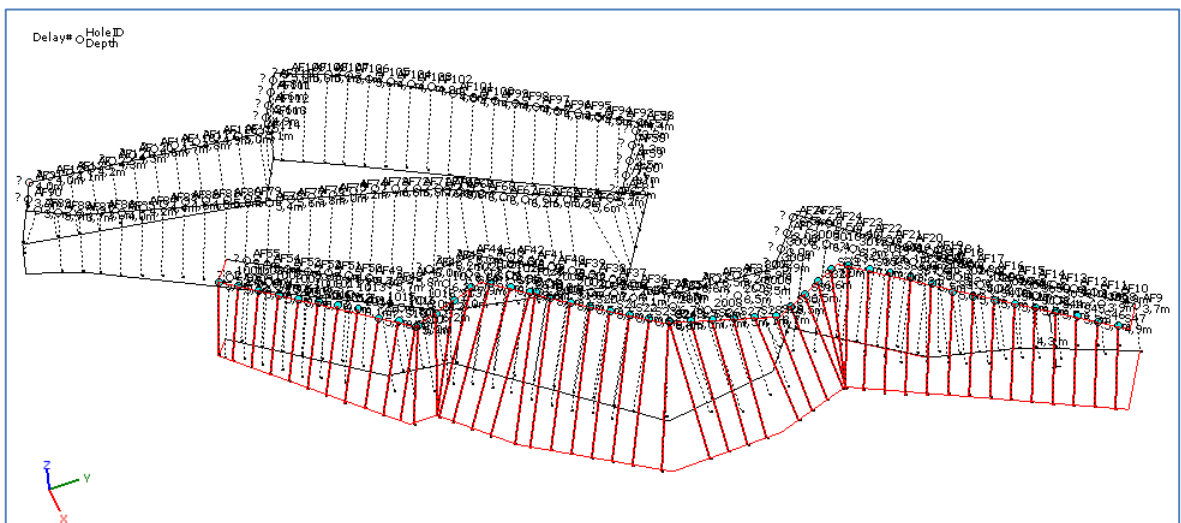
Malmimallien muotoa ja rajausta joudutaan usein vielä muokkaamaan, jotta malmikentät olisivat mahdollisimman hyvin porattavissa, ja malmitappion sekä sivukivilaimennuksen ennakoidut määrät olisivat samalla mahdollisimman pienet. Louhintaa varten muokatuista malmimalleista erotetaan mallin ylä- ja alapinnan taiteviivarajaukset, joita kaivoksen louhintaurakoitsija hyödyntää suunnitteluohjelmistoissa poraus- ja panostussuunnittelun lähtötietona. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki mineralisaatiomalleista (sininen ja ruskea), mineralisaatiomallien perusteella +115-korkeustason ja maanpinnan välille muodostetusta malmimallista (keltainen) sekä poraus- ja panostussuunnittelun lähtötiedoksi jalostetuista mallin ylä- ja alapinnan rajauksista (tumman siniset taiteviivat).





Kuva 12. Esimerkki kolmiulotteisista mineralisaatiomalleista ja malmimallista (keltainen) Surpac-kai-vossuunnitteluohjelmistossa. Harmaa kolmioverkko kuvaa suunniteltua avolouhosta.

Malmimallien taiteviivarajausten ja avolouhoksesta mitatun pisteaineiston perusteella ura-koitsija suunnittelee räjäytyskentän porausreiät sekä panostuksen käyttäen Orica ShotPlus ja Trimble Business Center -ohjelmistojä. Malmikenttien pienen koon ja vaihtelevan geometrian vuoksi malminlouhinnassa pengerkorkeus pidetään matalana (noin 5 metriä), ja malmin sekä sivukiven kontaktin räjäytys suoritetaan tarkkuuslouhintana. Tarkkuuslouhintalinjan rakoreikien suuntien ja kaltevuuksien on seurattava mahdollisimman hyvin malmin ja sivukiven arvioitua kontaktia, joten täsmällisen poraustuloksen aikaansaamiseksi poravaunuissa käytetään satelliittipaikannusta hyödyntävää Trimble DPS900-koneenohjausjärjestelmää. Kuvassa 13 on havainnollistettu tarkkuuslouhintalinjan rakoreikien poraussuunnittelua ShotPlus-ohjelmistolla.



Kuva 13. Esimerkki malmikentän rakolinjareikien poraussuunnittelusta Orica ShotPlus -ohjelmistossa.

Kaivoksella porausreikien halkaisijana käytetään 76 mm sekä kenttärei'issä että tarkkuuslouhintalinjan rakorei'issä. Etu ja reikäväli vaihtelevat tapauskohtaisesti. Yleensä malmitenttien ja niiden välisissä sivukivilouhinnoissa etu vaihtelee välillä 2,2-2,8 metriä ja reikäväli 2,0-2,8 m. Kenttärei'issä etutäytteen paksuus on normaalisti noin 1,7 m, ohiporaus 1,0-1,2 m ja reiät porataan 8,0 asteen kallistuksella. Räjähdysaineena kenttärei'issä käytetään pääasiassa Senatel Powerfrag 60x530 mm emulsioräjähdepatruunoita varsipanoksena sekä 60 mm dynamiittia aloite- ja pohjapanoksena. Suuremmissa sivukiviräjätöksissä räjähdysaineena käytetään pumpattavaa Centra Gold 75 -emulsiota sekä Pentex 500 -aloitepanoksia. Sytytys toteutetaan joko sähkönalleilla tai impulssiletkunalleilla käyttäen Exel Connectadet-pintahidasteita ja Exel U Det -räjäytysnalleja. Kaikissa malmiräjätöksissä kentät peitetään täkkäysmatoilla, jotta irrotettu malmi pysyy mahdollisimman hyvin kasalla ja lastaus on siten mahdollisimman vaivatonta. Peitettyjen kenttien räjäytöksissä käytetään aina sähkönalleja, jotta peittämisessä riskinä olevat sytytysjärjestelmän kytkentöjen irtoamiset voidaan havaita vastusmittauksilla.

Tarkkuuslouhintamenetelmänä käytetään raonräjäytystä, jossa rakolinjan reikäväli on 1,2 metriä. Esiraon räjäytys suoritetaan kenttäreikien räjäytyksen yhteydessä käyttämällä räjähtävää tulilankaa sekä 22x500 mm Senatel Powersplit -emulsioräjähdepatruunoita. Patruunat on tehtaalla valmiiksi yhdistetty toisiinsa 12 g/m räjähdysainetta sisältävällä räjähtävällä tulilangalla. Panostus suoritetaan laskemalla patruunoita reikään niin, että reiän pohjaosaan sijoitetaan kolme toisiinsa teipattua patruunaa (kuva 14). Reiän ylin patruuna leikataan pois, jolloin kannen paksuudeksi jää noin 0,5 metriä. Räjähtävä tulilanka (8 g/m) sidotaan reiän kahteen ylimpään patruunaan, ja maanpinnan yläpuolella oleva langan pää sidotaan tarkkuuslouhintalinjan reiät yhdistävään selkälankaan (10 g/m räjähtävä tulilanka). Reiän yläosaan lisätään muovinen etutäytteen paikallaan pitävä jarrujousi sekä noin 0,5 metrin kerros sepiä etutäytteeksi.



Kuva 14. Rakoreikien panostus Senatel Powersplit -emulsioräjähdepatruunoilla.

## 5 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

### 5.1 Yleistä koejärjestelyistä

Tutkimuksessa suoritettiin mittauksia Kaapelinkulman avolouhoksen louhituista kalliopenkereistä. Mittausmenetelmän valinnassa päädyttiin ilmakuvauksen ja fotogrammetrian yhdistelmään. Ilmakuvaukset suoritettiin UAV-multikopterilla eli droonilla, ja tuotettu digitaalinen valokuva-aineisto prosessoitiin fotogrammetrisia tekniikoita hyödyntävien tietokoneohjelmistojen avulla kolmiulotteisiksi geometria-aineistoiksi. Valittu mittaustapa on nopea, tehokas ja laitteistokustannuksiltaan edullinen menetelmä kohteiden geometrian tarkkaan kartoittamiseen.

Tärkeimpiä tutkimuskohteita olivat räjäytettyjen malmi- ja sivukivikenttien väliset tarkkuuslouhitut kalliorintaukset, joita mitattiin ja mallinnettiin 3D-aineistoiksi yhteensä 13 kappaletta. Tarkkuuslouhintamenetelmänä käytettiin raonräjäytystä kappaleessa 4.3 kuvatulla tavalla. Tutkimuskohde 13 sisälsi myös noin 10 metrin pituisen kallioseinämäosuuden, jonka louhinnassa ei käytetty raonräjäytystä. Louhinta toteutettiin pengerlouhintana, jossa kentän taaimmaisat reiät sijaitsivat suunnitellun kallioseinämän linjauksella reikävälillä vaihdellen 2,4-2,8 metrin välillä. Tutkimuskohteet 14 ja 15 louhittiin normaalina sivukiven pengerlouhintana avolouhoksen rakentamisen yhteydessä. Kyseiset kalliorintaukset mitattiin ja mallinnettiin tarkkuuslouhintatulosten vertailuaineistoiksi. Taulukossa 1 on esitetty malmi-sivukivi -kontaktipintoja kuvaavien tutkimuskohteiden numerointi, tarkasteltavan kalliopengerosuuden pituus sekä tieto siitä, onko kyseessä malmikentän etu- vai takaseinä.

**Taulukko 1. Tutkimuskohteet 1-13.2**

Tutkimus- kohde	Kalliopenkereen pituus [m]	Malminkentän etu-/takaosa E / T
1	30	T
2	21	T
3	18,5	T
4	24	E
5	22,5	T
6	22,5	E
7	23	T
8	27	E
9	30	E
10	21	T
11	30	T
12	31,5	E
13.1	20	T
13.2	10	T



Valokuvien fotogrammetrisen prosessoinnin tuloksena saatiin kolmiulotteinen ja tiheä miljoonia yksittäisiä pistehavaintoja sisältävä pistepilviaineisto, jossa jokainen pistehavainto sisälsi kolmiulotteisen sijaintitiedon xyz-koordinaatteina sekä RGB-väriarvon. Pistepilviaineistoa sekä siitä jalostettuja kolmioverkkopintoja eli pintamalleja verrattiin suunnitelma-aineistoihin tietokoneohjelmistojen avulla.

Tutkimusmenetelmiksi valittiin kalliopenkereiden mittaus- ja suunnitteluaineistojen keskinäinen vertailu

- 3D-aineistoja ja aineistoista muodostettuja poikkileikkauksia visuaalisesti havainnoimalla
- laskemalla mitattujen ja suunniteltujen kallioseinämäpintojen välisiä tilavuuksia
- määrittämällä poikkileikkauksista tietokoneavusteisesti kohtisuorat etäisyyserot toteutuneen ja suunnitellun kallioseinämän välillä.

3D-aineistojen ja poikkileikkausten visuaalinen tarkastelu valittiin tutkimusmenetelmäksi, jotta tarkkuusloughintatoteuman yksittäisiä ongelmakohtia voitaisiin paikantaa ja selvittää. Tilavuuslaskelmilla ja etäisyysmittausten avulla pyrittiin selvittämään, muodostuuko tarkkuusloughinnassa keskimäärin enemmän yli- vai aliloughintaa sekä millaiset vaikutukset kallioseinämän tarkkuusloughinnalla on muodostuviin malmitappion ja sivukivilaimennuksen määriin.

## 5.2 UAV-ilmakuvaus ja fotogrammetrinen mallinnus

Tutkimuksen ilmakuvaukset suoritettiin DJI Phantom 4 Pro V2.0 -droonilla (kuva 15). Kuvauslaitteistona käytettiin alkuperäistä kyseiseen kopteriin integroitua 20 megapikselin mekaanisella sulkimella varustettu kameraa sekä kuvan vakauttavaa gimbaalia. Yhdellä droonin akulla saavutettu lentoaika oli 20-30 minuuttia, joka riitti kerralla yhden kalliopenkereen kuvaamiseen.



Kuva 15. Ilmakuvauksessa käytetty DJI Phantom 4 Pro V2.0 -drooni.



Ennen penkereiden ilmakuvausta liikuteltavia signaalipisteitä sijoitettiin kuvattavalle alueelle viisi kappaletta. Lisäksi kaivosalueen reunoille maalattiin kallioon kiinteitä tuki-/signaalipisteitä, joita hyödynnettiin koko louhoksen kattavissa ilmakuvauksissa. Tukipisteiden tarkat x-, y- ja z-koordinaatit mitattiin satelliittimittauksella käyttäen Leica Viva GNSS GS12 -vastaanotinta ja CS15 -maastotallenninta. Kyseisillä satelliittimittauslaitteistoilla päästään noin 1-2 cm paikannustarkkuuteen hyödyntäen verkko-RTK-mittausta. Mittaukset sidottiin kaivoksella käytettyyn KKKJ2-koordinaattijärjestelmään sekä N2000-korkeusjärjestelmään. Esimerkki kallioon maalatusta signaalista on esitetty kuvassa 16. Liikuteltavat signaalit sekä niiden sijoittelu penkereen ilmakuvauksessa on esitetty kuvassa 17.



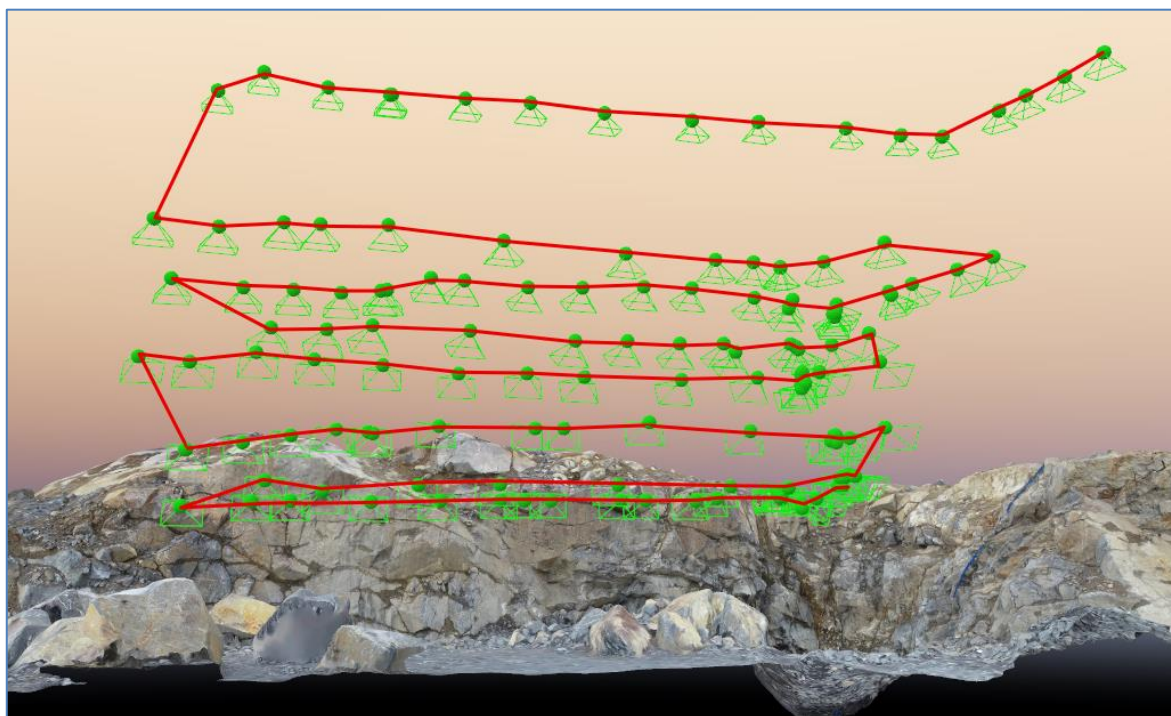
Kuva 16. Kallioon maalattu signaali.



Kuva 17. Penkereiden ilmakuvauksessa käytetyt liikuteltavat signaalit.



Kalliorintausten kuvauslennot suunniteltiin tapauskohtaisesti penkereen muodosta ja koosta riippuen. Lento suoritettiin manuaalisesti suunniteltua lentorataa pitkin aloittaen joko penkereen juurelta tai louhittavan kentän takaosasta, ja kuvat otettiin systemaattisesti niin, että jokaisen peräkkäisen kuvan tavoitteellinen päällekkäisyys oli vähintään 75 %. Esimerkki kuvauksen toteutuneesta lentoreitistä on esitetty kuvassa 18. Kalliopengertä kuvattiin vaihtelevasti eri etäisyyksiltä ja kaltevuuksilta, jotta fotogrammetriatekniikoita hyödyntävä 3D-mallinnusohjelmisto kykeni löytämään kuvien väliltä riittävästi yhteisiä pisteitä, määrittämään kameran kuvaussijainnit mahdollisimman tarkasti ja muodostamaan siten mahdollisimman mittatarkan pisteaineiston. Kuvaaminen pyrittiin suorittamaan kuitenkin aina mahdollisimman kohtisuoraan mitattavaan pintaan nähden. Kameran ja kuvattavan kohteen välinen etäisyys vaihteli 5-20 metriin, jolloin kuvien GSD-arvo vaihteli välillä 0,15-0,60 cm/pikseli. Kuvien lukumäärä vaihteli välillä 150-250 kpl/mittauskohde.



**Kuva 18.** Penkereen ilmakuvauksen toteutunutta lentoreittiä havainnollistettu punaisella murtoviivalla.

Kuva-aineiston prosessointiin kolmiulotteisiksi pistepilviaineistoiksi ja pintamalleiksi käytettiin Autodesk ReCap Photo, Agisoft Metashape ja Pix4Dmapper-ohjelmistoja. Ennen aineiston prosessointia kuville tehtiin nopea laadunvarmistus tarkastelemalla niitä yksitellen ja poistamalla aineistosta mahdollisesti yli- tai alivalottuneet sekä epäterävät kuvat. Kuva-aineistojen prosessointiin liittyvät käyttäjän suorittamat työvaiheet ja niiden järjestys poikkesivat eri ohjelmissa jonkin verran keskenään. Pääpiirteittäin työvaiheet kuvien prosessoinnissa olivat seuraavat:

1. Perustettiin uusi mallinnusprojekti.
2. Ladattiin prosessoitava kuva-aineisto ohjelmaan.
3. Tarkastettiin, että ohjelma on tunnistanut oikein käytetyn kameralaitteiston ja kameraparametrit kuvien attribuuttitietojen perusteella.
4. Valittiin koordinaattijärjestelmä tuotettaville 3D-aineistoille.
5. Ohjelmisto orientoi kuvat määrittämällä kameran kuvaussijainnit ja muodosti kuva-areista havaituista yhteisistä pisteistä harvan pistepilven.

6. Signaalipisteiden koordinaatit tuotiin ohjelmaan ja signaalien keskikohdat osoitettiin 5-10 ohjelmaan ladatusta kuvasta.
7. Kameran kuvaussijainnit optimoitiin signaalipisteiden koordinaattien perusteella.
8. Ohjelmisto prosessoi tiheän pistepilviaineiston.
9. Pistepilviaineiston lisäksi mallinnettiin tarvittaessa kolmioitu ja teksturoitu pinta-malli.
10. Prosessoinnin lopuksi tarkastettiin visuaalisesti tuotettu aineisto sekä ohjelmiston tuottama laadunvarmistusraportti mahdollisten virheiden varalta.
11. Tallennettiin lopputuotteet haluttuun tiedostomuotoon, kuten LAS- ja OBJ-formaatteihin.

Pistepilviaineistoja rajattiin ja tarvittaessa pistetiheyttä harvennettiin CloudCompare-ohjelmalla. Lisäksi kyseisellä ohjelmalla tehtiin pistepilviaineiston laadunvarmistusta vertaamalla aineistoa satelliittipaikantimella mitattuihin pisteisiin, aiemmin mitattuihin ja mallinnettuihin aineistoihin ja/tai koko kaivoksen kattaviin pistepilviaineistoihin. Laadunvarmistusta tehtiin myös fotogrammetriaohjelmistolla käyttämällä ylimääräisiä tukipisteitä aineiston tarkkuuden tarkastamisessa.

### **5.3 Mittaustulosten analysointimenetelmät**

#### **5.3.1 Poikkileikkaukset**

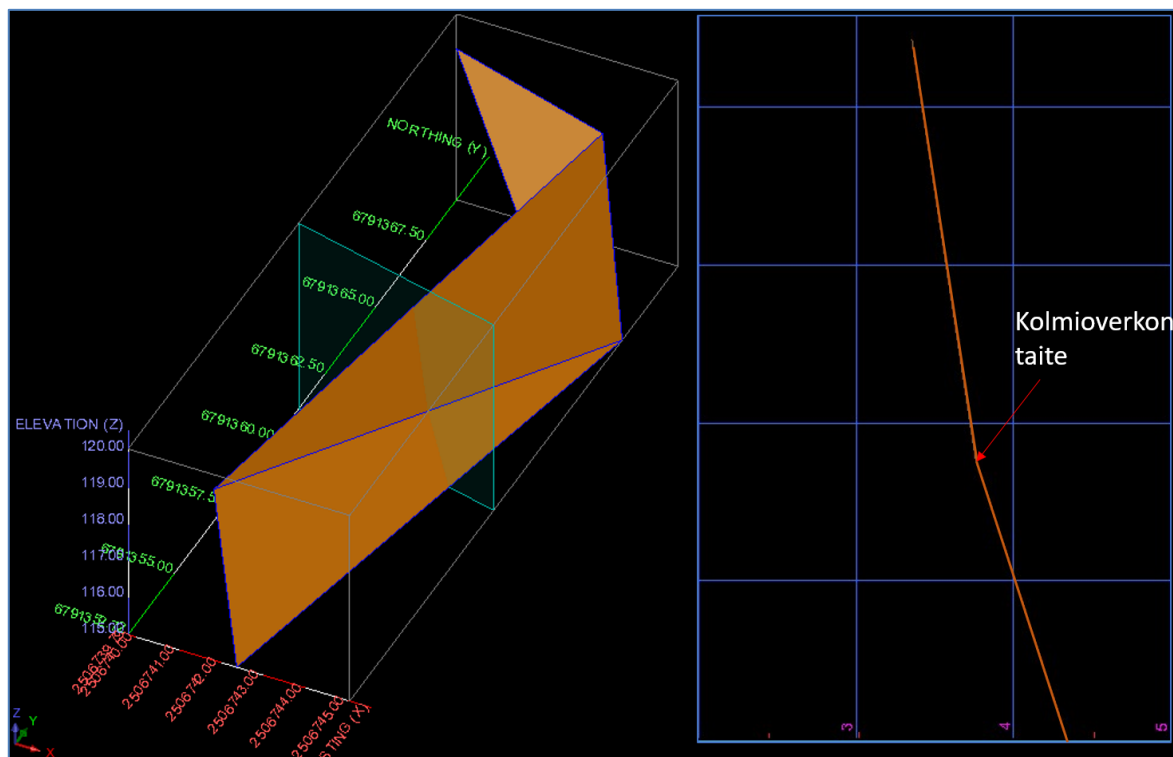
Poraussuunnitelmien, porauksen ja räjäytystyön onnistumista havainnoitiin ja arvioitiin Surpac-kaivossuunnitteluohjelmistolla tuotettujen poikkileikkausten avulla. Poikkileikkauksia tutkittiin kaikista 15 tutkimuskohteesta. Louhittujen kalliopenkereiden mittaus- ja suunnitteluaineistoista muodostettiin 0,2 metrin välein pystysuuntaisia leikkauksia ennalta määrättyä linjausta seuraten. Yhteensä 1875 poikkileikkauksesta tuloksiin sisällytettiin vain havainnollisimmat ja eri tilanteita parhaimmin kuvaavat leikkaukset.

Poikkileikkauksiin sisällytettiin tutkittavasta kohteesta riippuen kahdesta neljään eri aineistoa:

1. kalliopenkereestä mitatusta pistepilviaineistosta muodostettu kolmioitu pintamalli
2. suunniteltu malmi-sivukivi -kontaktia kuvaava pinta (suunniteltu tarkkuuslouhintapinta)
3. poraussuunnitelman porausreikien välille muodostettu pinta
4. mittausaineistosta digitoitujen porausreikien välille muodostettu pinta, mikäli porausreikien puolikkaat olivat pistepilviaineistosta selkeästi havaittavissa.

Poikkileikkausten mahdollistamiseksi kalliopenkereestä mitatusta pisteaineistosta muodostettiin pintamalli Surpac-ohjelmistolla. Kolmioverkon muodostuksessa käytettiin 3D Deviation -asetusta, ja kolmiointitoiminnon prosessointia kevennettiin asettamalla kolmion nurkkapisteen väliseksi sallituksi etäisyydeksi 5 cm. 3D-asetuksella kolmioverkko voi sisältää useita z-akselin arvoja samassa xy-tason pisteessä, mikä mahdollistaa esimerkiksi pystysuoran kallioseinämän ryöstöjen mallintumisen mahdollisimman realistisesti pintamalliin.

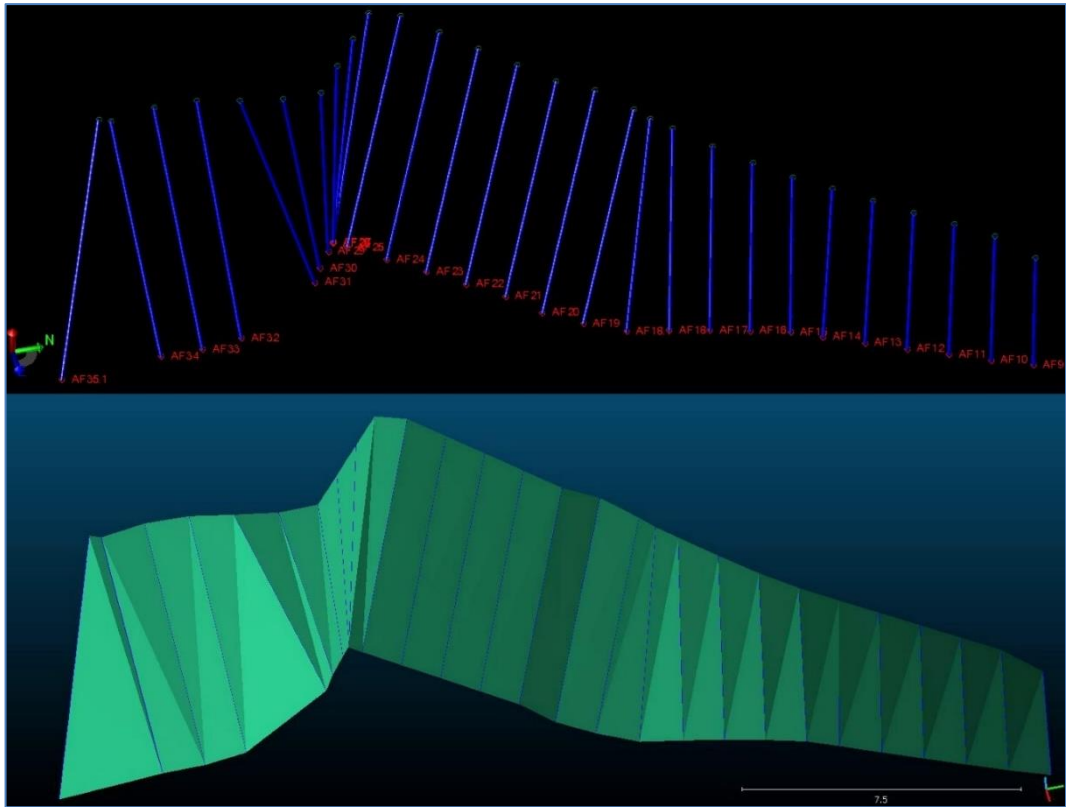
Kolmiulotteisten malmimallien pystypinnat muodostettiin kolmioimalla mallin ylä- ja alapinnan taiteviivarajausten välinen osuus. Taiteviivarajauksessa on harvakseltaan taitepisteitä, ja siten vähän kolmioverkon kolmioiden nurkkapisteitä. Pinta rakentuu siten suurista kolmioista, jolloin kolmion sivujen välille muodostuu taite, joka on parhaiten havaittavissa poikkileikkauksen avulla (kuva 19). Kyseiset taitteet mallissa on otettu huomioon malmimallien muodostuksessa.



**Kuva 19.** Vasemmalla malmimallista erotettu kalliorintauksen suunnitelmapinta. Oikealla poikkileikkaus kolmioverkon taitteesta. (Poikkileikkauksen sijainti on esitetty mallissa vaalean turkoosina pystysuorana tasona.)

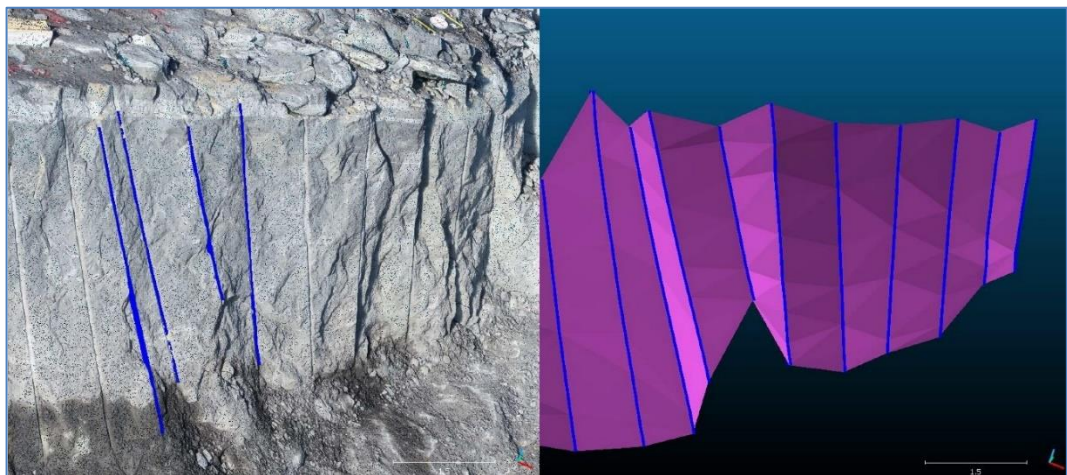
Poravaunun koneohjausjärjestelmään syötettävän poraussuunnitelma-aineiston perusteella muodostettiin pintamalli kuvaamaan tarkkuuslouhintalinjan reikäriiviä ja pengerlouhinnan tapauksessa louhittavan kentän viimeistä reikäriiviä. Porausreiät muutettiin Trimble Business Center -ohjelmistolla yksittäisiksi 3D-murtoviivoiksi, jotka kuvaavat porareikiä havainnollistavien lieriöiden akseleita. Murtoviivat tallennettiin dxf-formaattiin, ja murtoviivojen välit kolmioitiin yhtenäiseksi pintamalliksi Surpac-ohjelmistolla. Poraussuunnitelmaa ja siitä muodostettua pintamallia on havainnollistettu kuvassa 20.





Kuva 20. Ylhäällä tarkkuuslouhintalinjan poraus suunnitelma, alhaalla suunnitelman perusteella muodostettu kolmioverkkopinta.

Kalliorintausten pisteaineistoista digitoitiin porausreikiä 3D-murtoviivoiksi CloudCompare-ohjelmistolla, mikäli räjäytettyjen reikien ”puolikkaat” olivat pisteaineistosta selkeästi erotettavissa. Toteutuneita porausreikiä kuvaavat 3D-murtoviivat muodostettiin valitsemalla aineistosta mahdollisimman tarkasti porausreikien vaipan takaosaa kuvaavat pisteet. Digitoitu 3D-murtoviiva ei siten kuvaa täydellisesti reiän keskikohtaa, vaan oletettavissa on reikien digitointitavasta johtuen reiän säteen suuruinen virhe murtoviivan ja kuvitellun porareikälieriön akselin välillä. Digitoiduista murtoviivoista muodostettiin Surpac-ohjelmistolla kolmioverkkopinnat vierekkäisten reikien välille. Kuvassa 21 on havainnollistettu pisteaineistosta digitoituja porausreikiä sekä 3D-murtoviivojen avulla muodostettua pintamallia.



Kuva 21. Vasemmalla neljä pisteaineistosta digitoitua porausreikää (siniset 3D-murtoviivat), oikealla aineistosta digitoitujen reikien perusteella muodostettu pintamalli.

Poikkileikkausten linjauksena, jota kohtisuoraan leikkaukset muodostettiin, käytettiin suunniteltujen tarkkuuslouhintapintojen yläreunan taiteviivaa ja pengerlouhituissa tutkimuskoh-teissa 14 ja 15 poraussuunnitelmasta muodostetun pinnan yläreunan taiteviivaa. Poikkileik-kauksista ja 3D-aineistoista tehdyt havainnot on esitetty kappaleessa 6.1. Poikkileikkausku-vissa mittakaavaa on havainnollistettu ruudukolla, jossa yhden ruudun sivun pituus on 2 metriä.

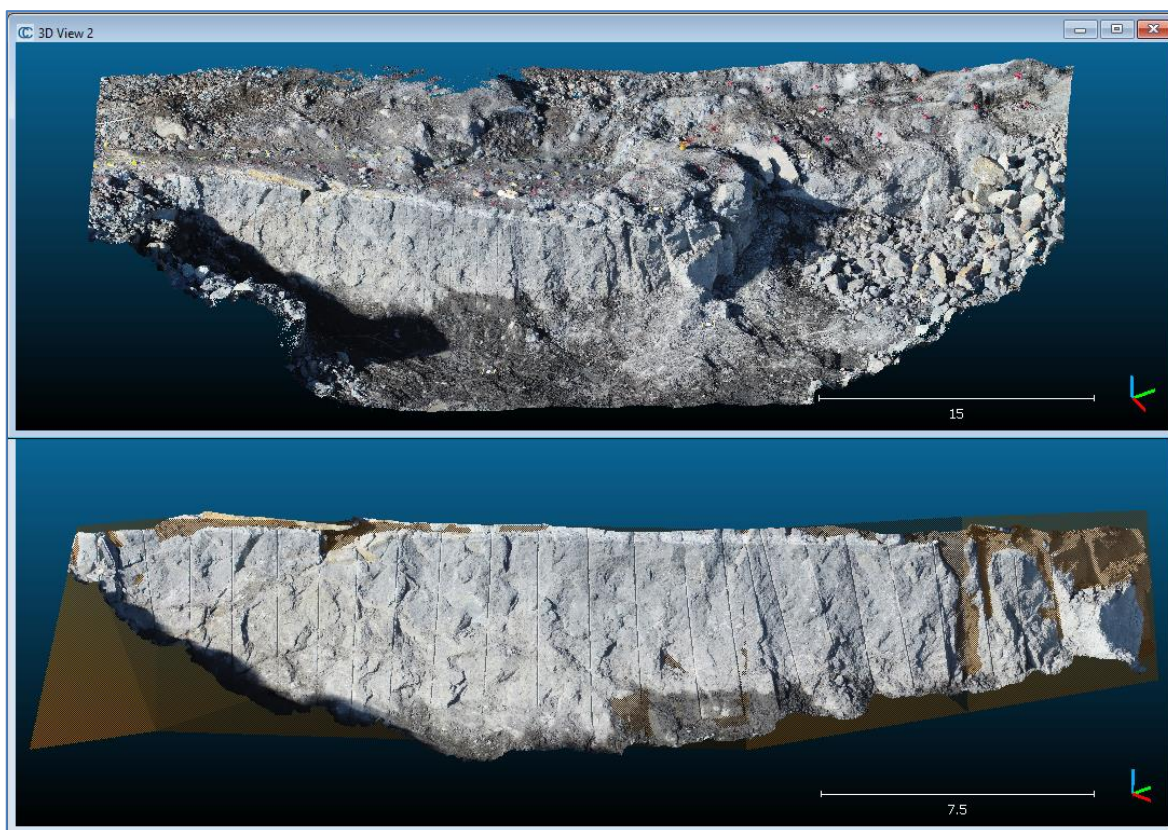
### 5.3.2 Tilavuuslaskenta

Tilavuuslaskelmilla tutkittiin louhinnassa syntyvien malmitappion ja sivukivilaimennuksen määriä laskemalla suunniteltuun tarkkuuslouhintapintaan nähden toteutuneita yli- ja ali-louhinnan tilavuuksia. Laskelmissa toteutuneen kallioseinämän pistepilviaineistoa verrattiin suunnitellusta tarkkuuslouhintapinnasta muodostettuun tiheään pistepilveen CloudCom-pare-ohjelmiston 2.5D volume -toiminnolla. Lisäksi lasketut tilavuudet muutettiin massoiksi käyttämällä kiintotiheyden arvoa  $2,82 \text{ tn/m}^3 \text{ ktr}$ , jota sovelletaan myös Kaapelinkulman kai-voksen massamäärien seurannassa.

CloudCompare-ohjelmiston tilavuuslaskentatoiminnolla voidaan laskea tilavuusero kahden pistepilven tai tietyllä vakiokorkeudella olevan tason ja pistepilven välillä. Laskentamene-telmässä aineistot jaetaan kaksiulotteiseen ruudukkoon (grid). Jokaiselle ruudulle lasketaan ruudukon tasoon nähden kohtisuorat etäisyyshavainnot kumpaankin laskennassa mukana olevaan aineistoon. Kahden etäisyyshavainnon erotus kuvaa siten aineistojen keskinäistä etäisyyseroa yhden ruudun alueella. Etäisyyshavaintojen erotukset määrittävät ruudukon ruuduille korkeudet, jolloin ruudukkoon muodostuu kuvitteellisia suorakulmaisia särmiöitä. Tilavuuslaskennan tulos muodostuu särmiöiden tilavuuksien summana, jossa negatiivisten tilavuuksien summa kuvaa leikkausta (ylilouhintaa) ja positiivisten tilavuuksien summa täyt-töä (alilouhintaa). Tilavuuslaskenta perustuu siten aineistojen etäisyyseroihin ennalta mää-ritetyssä x-, y- tai z-akselin suunnassa.

Ennen varsinaista tilavuuslaskentaa aineistot muokattiin laskentaan sopiviksi. Suunnitellun tarkkuuslouhintapinnan muodostusprosessi on esitetty aiemmin kappaleessa 5.3.1 Poikki-leikkaukset. Tarkkuuslouhintapinnan kolmioverkosta muodostettiin CloudCompare-ohjel-malla tiheä pisteaineisto ( $10\,000 \text{ pistettä/m}^2$ ) tilavuuslaskennan referenssiaineistoksi.

Kalliopenkereestä mitatusta pistepilviaineistosta tarkasteluun otettiin vain tarkkuuslouhitun kallioseinämän osuus, joten aineistoa rajattiin manuaalisesti kuvaamaan mahdollisimman hyvin suunniteltua pintaa. Kaikki irtonaiseksi tulkittu kiviaines sekä selvästi alilouhitut kal-liouloukkeet, jotka rusnataan tai rikotetaan mekaanisesti iskuvasaralla ennen seuraavaa räjäy-tystä, pyrittiin rajaamaan pisteaineiston ulkopuolelle. Lisäksi massalaskentaan ei huomioitu mukaan louhitun kentän pohjan epätasaisuutta, kuten kynsiä. Mittausaineiston rajausta on havainnollistettu kuvassa 22.



**Kuva 22.** Ylhäällä kalliopenkereen valokuvista prosessoitu rajaamaton pistepilviaineisto. Alapuolella on esitetty massalaskentaa varten rajattu pistepilviaineisto sekä ruskealla suunniteltu tarkkuuslouhintapinta.

Tilavuuslaskennassa kaksiulotteinen ruudukko muodostettiin xy-tasolle ja etäisyyshavaintojen mittaussuunnaksi valittiin z-akseli. Tilavuuslaskennan virhelähteiden ehkäisemiseksi laskennan aineistojen koordinaatistoja manipuloitiin niin, että suunniteltu tarkkuuslouhintapinta olisi mahdollisimman tarkasti xy-tason suuntainen ja pinnan normaali z-akselin suuntaan. Aineistojen orientoinnin avulla z-akselin suuntaisten etäisyyshavaintojen ero kuvaa mittausaineiston kohtisuoraa etäisyyttä suunniteltuun tarkkuuslouhintapintaan. Molemmat laskettavat aineistot käännettiin CloudCompare-ohjelmiston Apply transformation -toiminnolla samanaikaisesti, jotta aineistojen keskinäiset etäisyydet eivät muutu orientoinnissa.

Tilavuuslaskennassa hyödynnettävien särmiöiden korkeuden määrittämis menetelmäksi valittiin keskiarvo. Keskiarvo lasketaan, mikäli yhden ruudun alalle osuu useampi kuin yksi korkeuspistehavainto. Laskennan tulosten tarkkuuteen vaikuttaa olennaisesti ruudukon ruutujen koko, joka määrittää laskettavien särmiöiden määrän ja koon. Suuri määrä pienempiä särmiöitä tuottaa yleensä tarkemman lopputuloksen. Tähän tutkimukseen valittiin testilaskentojen perusteella käytettäväksi 5 x 5 cm ruutukoko. Tätä pienemmän ruutukoon käytön ei todettu enää merkittävästi tarkentavan laskentatulosta. Lisäksi pieni ruutukoko aiheutti laskenta-algoritmeille ongelmia niissä kohdin, joissa mittausaineisto oli harvaa ja ruutujen kohdalle ei osunut yhtään pistehavaintoa.

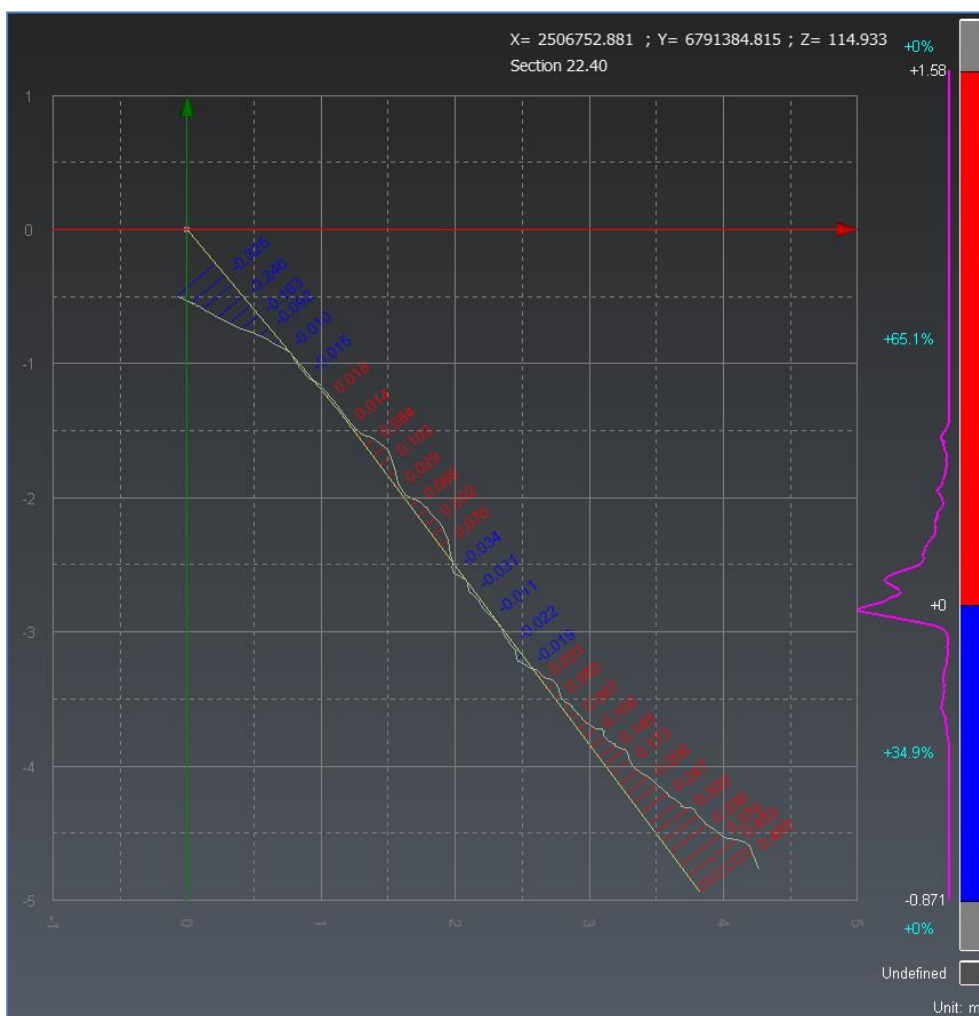
Tutkimuskohteiden 1-13 tilavuuslaskentojen tulokset on esitetty kappaleessa 6.2.

### 5.3.3 Etäisyseromittaukset poikkileikkausmenetelmällä

Poikkileikkauksista laskettavilla etäisyseromittauksilla tutkittiin, onko tarkkuuslouhituissa kallioseinämissä keskimäärin enemmän ali- vai ylilouhintaa.

3DReshaper-ohjelmistolla suoritettavissa poikkileikkausmittauksissa käytettiin tilavuuslaskentoja varten rajattuja kallioseinämien mittaussaineistoja sekä suunniteltuja tarkkuuslouhintapintojen pintamalleja. Poikkileikkausmittauksiin hyödynnettiin toimintoa, joka on tarkoitettu tunnelipoikkileikkausten muodostamiseen ja louhintatoleranssien mittaamiseen. Toiminto määrittä poikkileikkauksista kohtisuoria etäisyserohavaintoja suunnitellun pintamallin ja mitatun pisteaineiston välillä sekä laski jokaiselle poikkileikkaukselle etäisyserohavaintojen keskiarvon.

Poikkileikkaukset muodostettiin vastaavasti kuin Surpac-ohjelmistolla eli 0,2 metrin välein käyttäen suunnitellun tarkkuuslouhintalinjan yläreunan taiteviivaa linjauksena. Poikkileikkausten etäisyserohavaintojen keskiarvoja kertyi 0,2 metrin poikkileikkausvälillä tutkittavan kallioseinäkereen pituudesta riippuen 100-200 kpl/mittauskohde. Esimerkki 3D-reshaper-ohjelmistolla luodusta poikkileikkauksesta ja etäisyserohavainnoista on esitetty kuvassa 23. Kuvassa positiiviset (punaiset) arvot kuvaavat alilouhintaa ja negatiiviset (siniset) arvot puolestaan ylilouhintaa.



Kuva 23. Poikkileikkausmittaus kohtisuorista etäisyyksistä suunnitellun ja toteutuneen kallioseinän välillä. Punaiset etäisyserohavainnot edustavat alilouhintaa ja siniset ylilouhintaa.

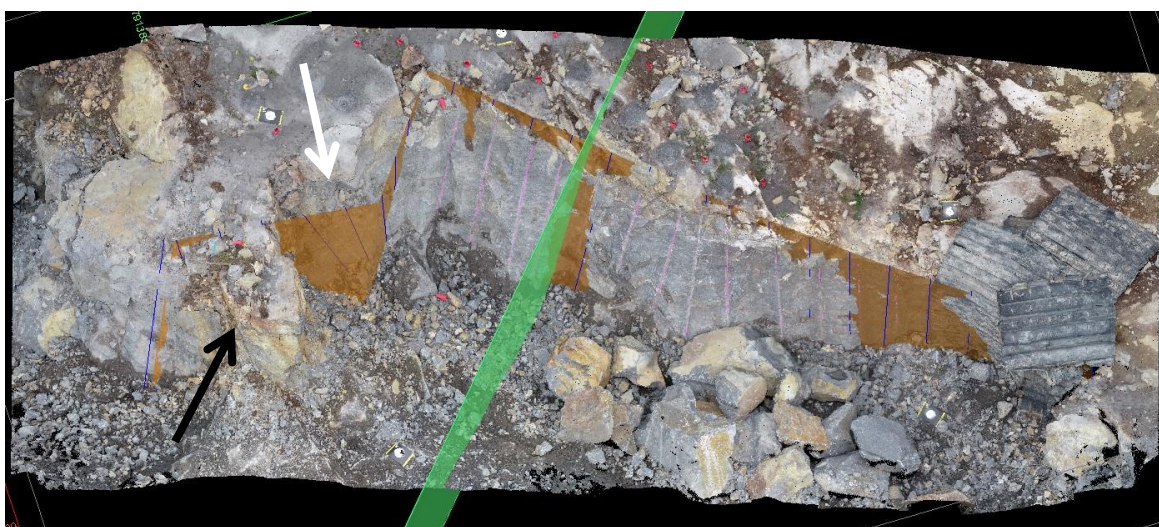


## 6 Tulokset ja havainnot

### 6.1 Poikkileikkaukset ja visuaaliset havainnot 3D-aineistoista

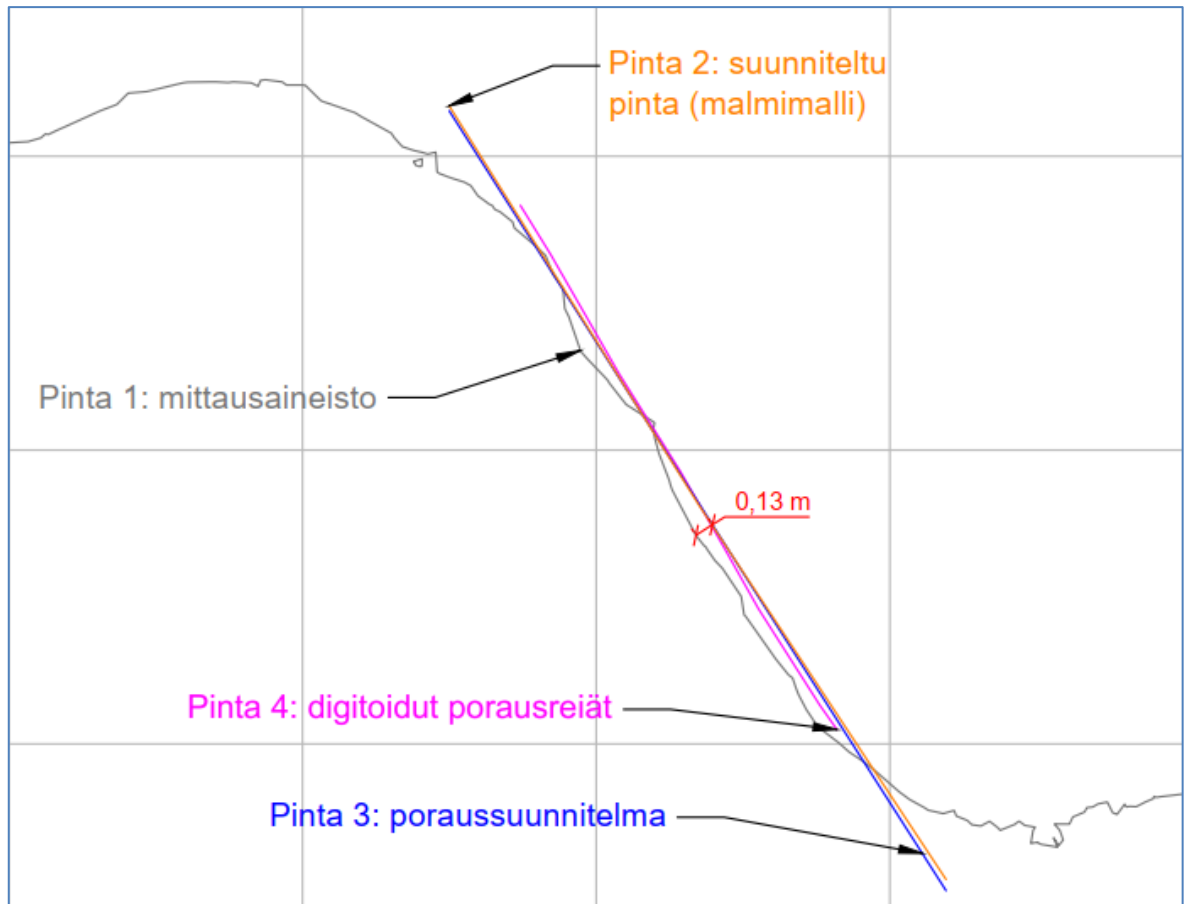
Tuloksissa on esitetty poikkileikkauksista vain havainnollisimmat ja toisistaan poikkeavat tapaukset. Tarkemmat kuvat tutkimuskohteiden pisteaineistoista on esitetty liitteissä 1-15.

Kuvassa 24 on havainnollistettu tutkimuskohteen 1 tarkkuuslouhitun kalliopenkereen pisteaineistoa, suunniteltua tarkkuuslouhintapintaa (ruskea pinta) sekä suunniteltuja porausreikiä (siniset 3D-murtoviivat). Vihreä pinta kuvaa kuvassa 25 esitettyä poikkileikkausta 78. Kuvan vasemmalla puolella voidaan havaita vierekkäin sekä alilouhittu kallioulouke että ylilouhintaa tarkkuuslouhintalinjan taitteessa. Kalliorintauksen pitemmässä osuudessa tarkkuuslouhintaa näyttää visuaalisesti onnistuneelta rakoreikien puolikkainen ollessa selvästi havaittavissa aineistosta.



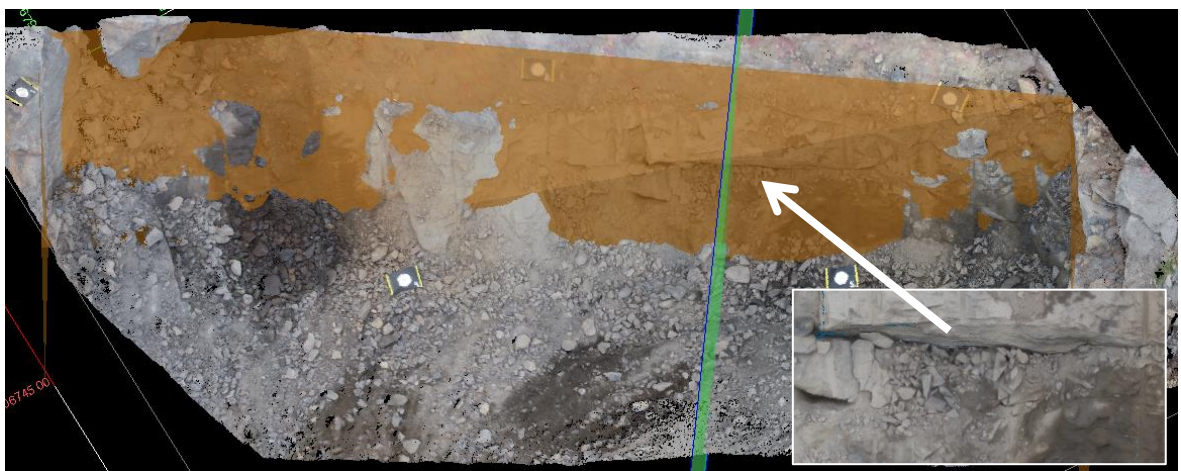
Kuva 24. Tutkimuskohteen 1 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 78 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Mustalla nuolella on osoitettu alilouhittu kallioulouke ja valkoisella nuolella ylilouhintaa tarkkuuslouhintalinjan käännöksessä.

Tarkkuuslouhintalinjan reikien välistä muodostetussa poikkileikkauksessa (kuva 25) voidaan havaita, että suunniteltu tarkkuuslouhintapinta, poraussuunnitelman perusteella muodostettu pinta ja digitoiduista porausreikien välille kolmioitu pinta ovat lähes yhdensuuntaiset eikä etäisyys eroa pintojen välillä ole kuin muutamia senttimetrejä. Myös toteutunut louhintatulos vastaa hyvin edellä mainittuja pintoja lukuun ottamatta pientä ylilouhintaa rintausten yläreunassa ja alilouhintaa penkereen juuressa. Vierekkäisten tarkkuuslouhintareikien välille muodostettuun pintaan nähden kallioseinä on ryöstynyt enimmillään 0,13 metrin etäisyydeltä.

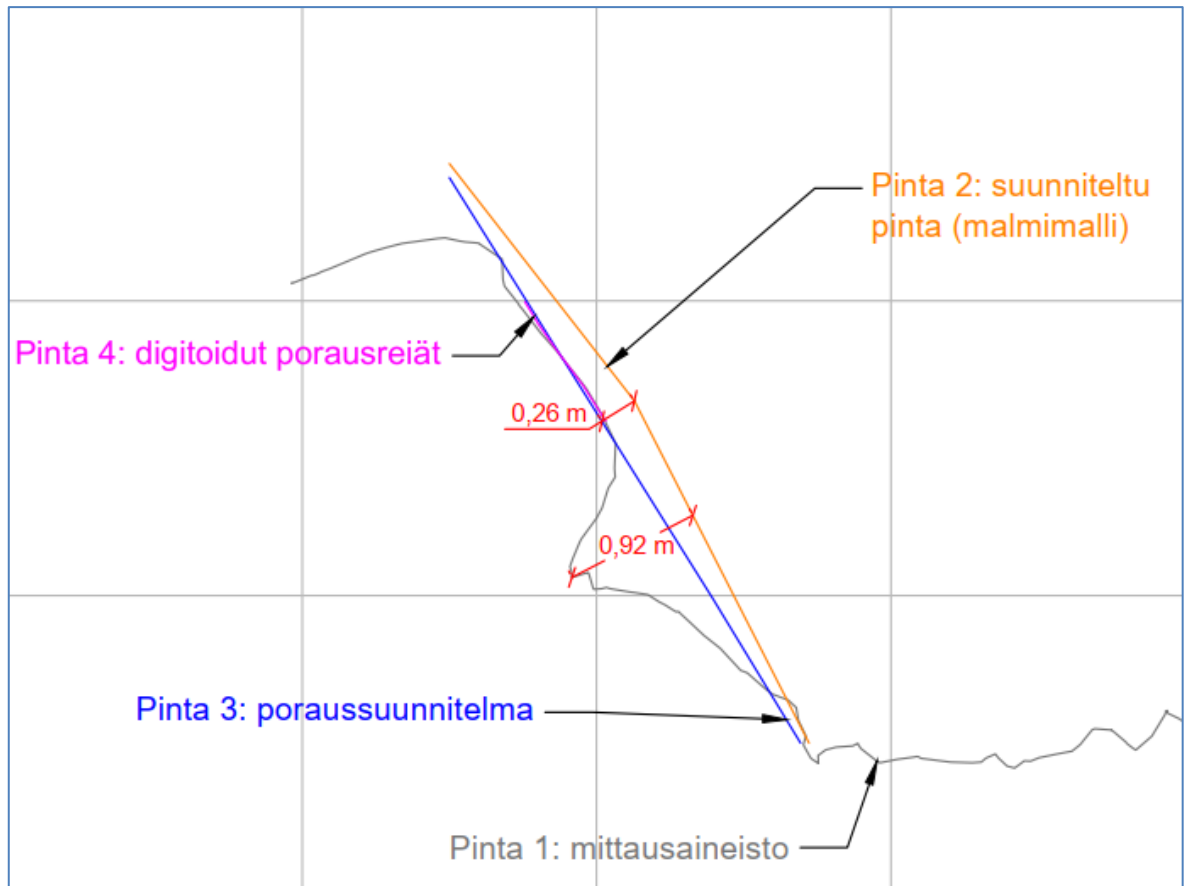


Kuva 25. Tutkimuskohde 1, leikkaus 78.

Kuvan 27 poikkileikkauksesta 71 havaitaan ylilouhintaa kalliorintauksen keskivaiheilla. Poikkileikkauksen ja ryöstön sijainnit on esitetty kuvassa 26. Ryöstön suurin kohtisuora etäisyys poraussuunnitelmapintaan on 0,73 metriä ja suunniteltuun tarkkuuslouhintapintaan on 0,92 metriä. Muilta osin toteutunut kallionpinta noudattelee poikkileikkauksessa hyvin poraussuunnitelmaa. Poraussuunnitelmapinnan ja suunnitellun tarkkuuslouhintapinnan ylä- ja alareuna ovat lähellä toisiaan. Tarkkuuslouhintapinnan taitteen kohdalla pintojen välinen etäisyys on 0,26 metriä.



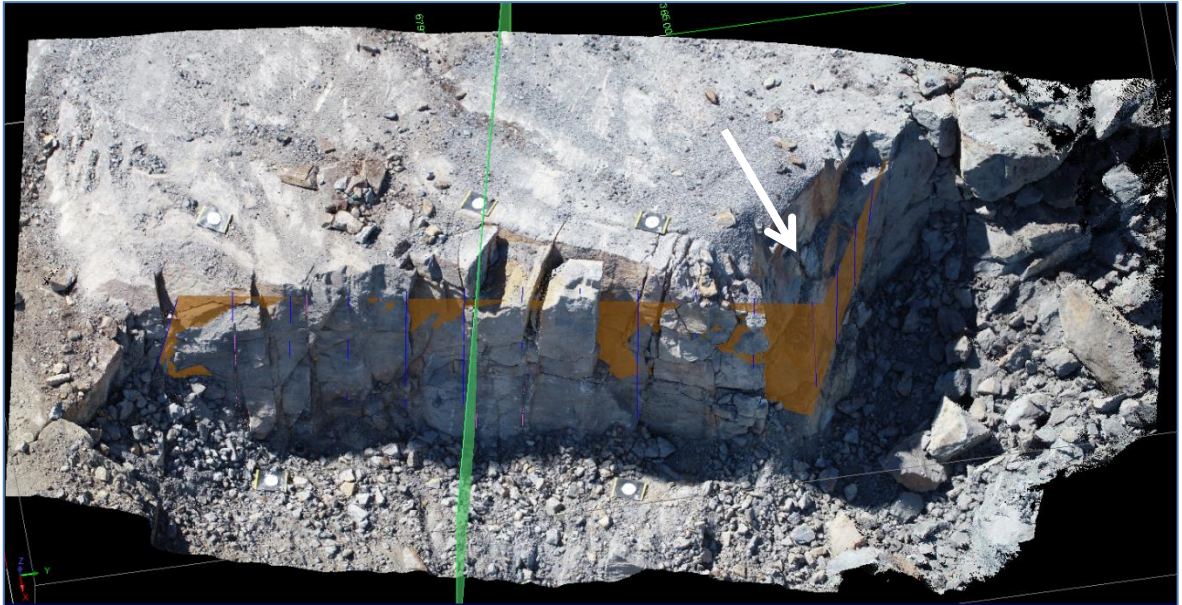
Kuva 26. Tutkimuskohteen 2 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 71 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu ryöstynyt osuus kallioseinäessä ja oikealla suurennos kyseisestä kohdasta.



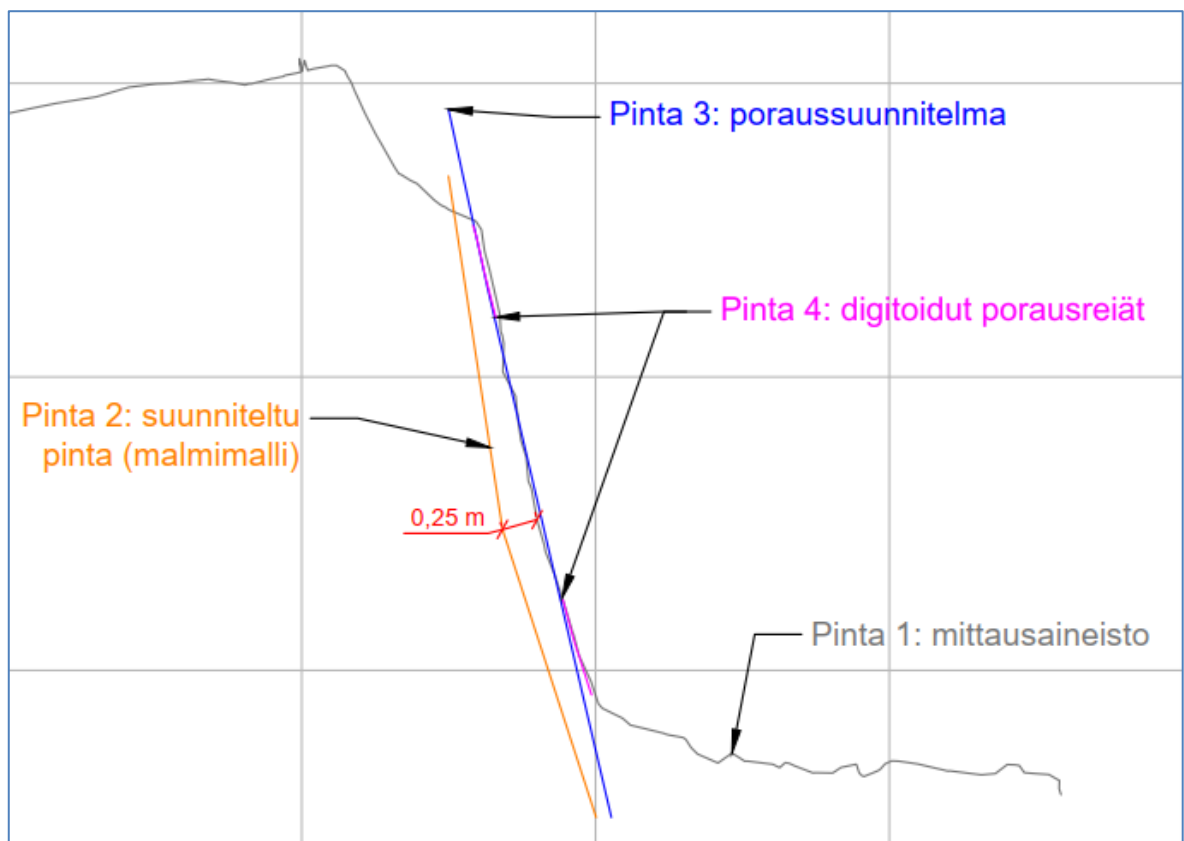
Kuva 27. Tutkimuskohde 2, leikkaus 71.

Tutkimuskohde 3 (kuva 28) kuvaa kallioseinämää, jonka edestä on räjäytetty malmikenttä. 3D-aineistosta voidaan visuaalisesti havaita kallion rikkonaisuus sekä ylilouhintaa kallioseinämän nurkassa, jossa suunniteltu tarkkuuslouhintapinta kääntyy lähes 90 astetta. Mallin keskivaiheilta muodostettu poikkileikkaus (kuva 29) havainnollistaa poraussuunnitelman, porauksen ja suunnitelmapinnan suhdetta toteutuneeseen kallioseinämään. Poraussuunnitelma, toteutunut poraus ja seinämän geometria vastaavat hyvin toisiaan, lukuun ottamatta irronnutta lohkaretta seinämän yläosassa. Poikkileikkauksen perusteella suunniteltu tarkkuuslouhintapinta on keskimäärin 0,15-0,25 metriä kallioseinämän sisässä.





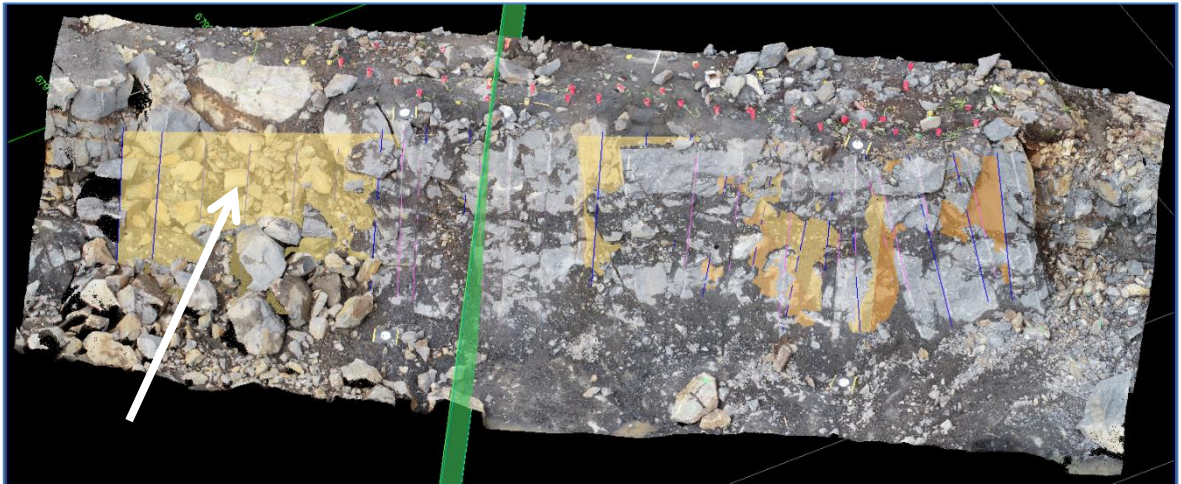
Kuva 28. Tutkimuskohteen 3 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 31 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu ylilouhinta tarkkuuslouhintalinjan jyrkässä käänöksessä.



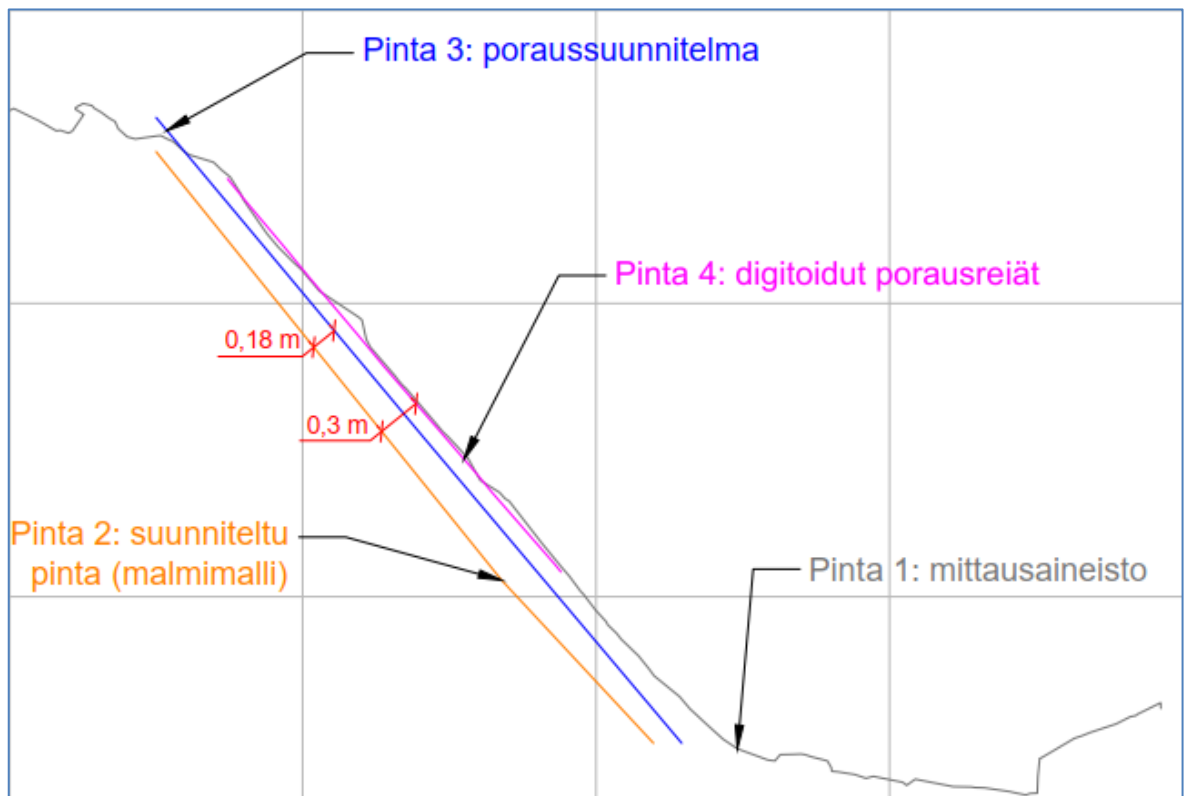
Kuva 29. Tutkimuskohde 3, leikkaus 31.



Tutkimuskohteen 4 (kuva 30) vasemmassa reunassa on havaittavissa huomattavaa ylilouhintaa, jossa etäisyys kalliopinnan ja suunnitelmapiinnan välillä on enimmillään 2,1 metriä. Muussa osin kalliorintausta useimmat rakolinjan reiän puolikkaat ovat havaittavissa pisteaineistosta. Kuvassa 31 esitetty poikkileikkaus on muodostettu kohdasta, jossa 3D-aineiston visuaalisen tarkastelun perusteella on muuta kallioseinämäosuutta enemmän alilouhintaa. Poikkileikkauksesta voidaan havaita, että kaikki neljä pintaa ovat keskenään yhdensuuntaisia. Tarkkuuslouhintapinta on keskimäärin 0,35 metriä kallion sisässä. Ero poraussuunnitelman ja toteutuneen porauksen välillä on noin 0,1 metriä.

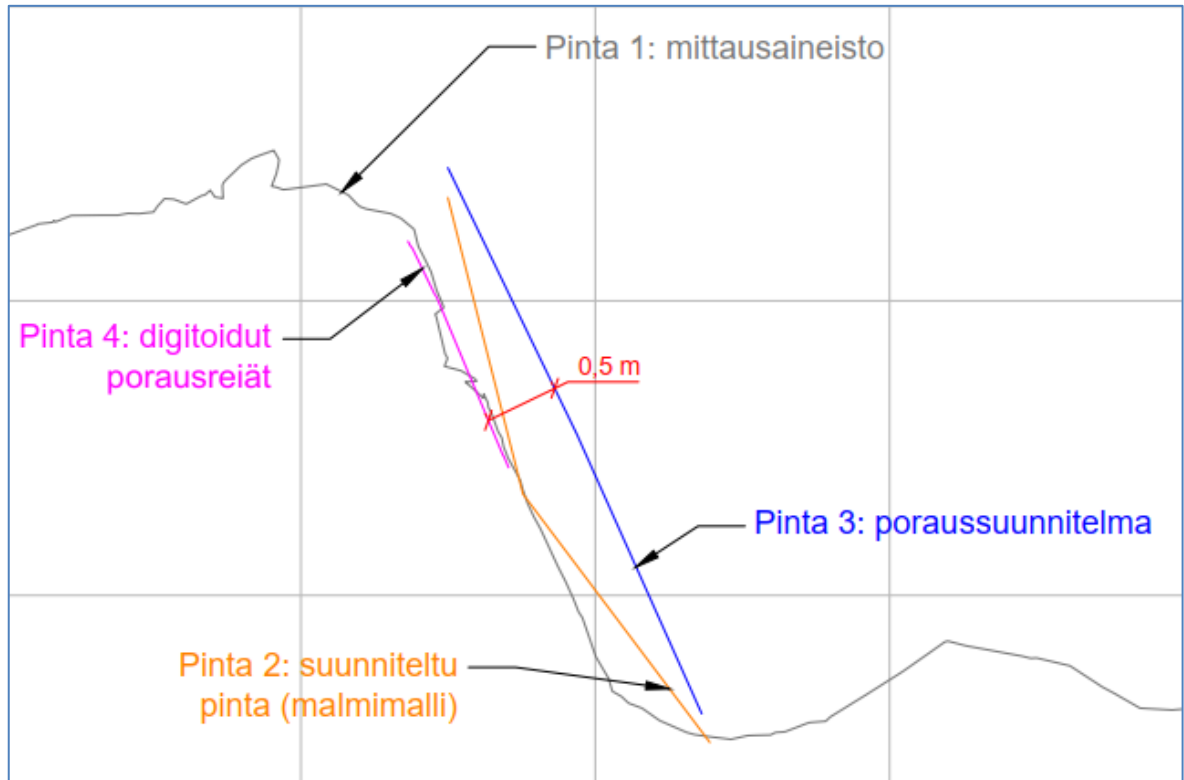


Kuva 30. Tutkimuskohteen 4 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 50 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on esitetty suuri ylilouhittu osuus kalliopenkereessä.

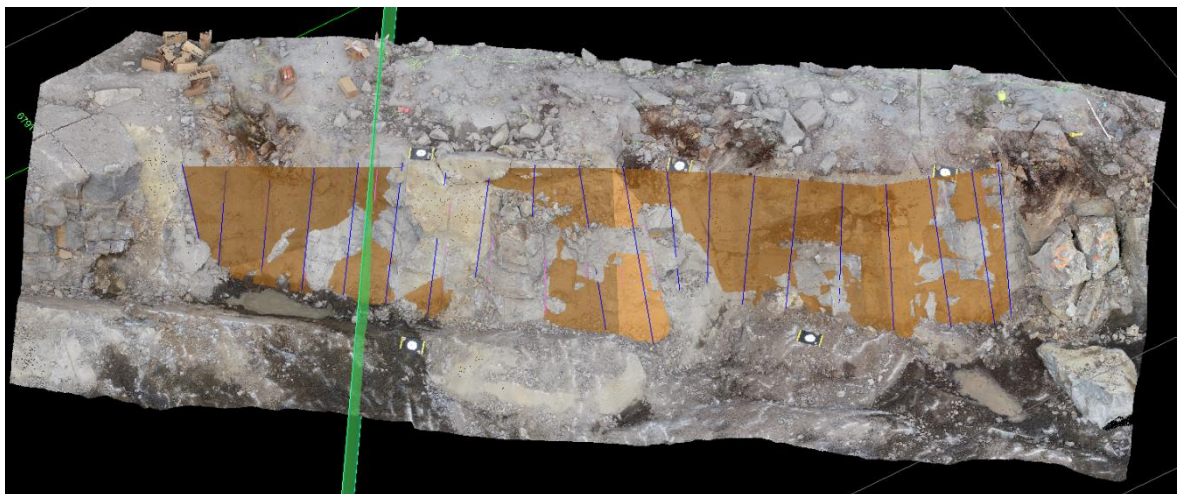


Kuva 31. Tutkimuskohde 4, poikkileikkaus 50.

Kuvan 32 poikkileikkauksesta (tutkimuskohde 5, leikkaus 26) havaitaan, että porauksen ja louhitun kallioseinämän kohtisuora etäisyys poraussuunnitelmapintaan on keskimäärin 0,5 metriä. Lisäksi malmimallin perusteella muodostettu suunniteltu kallionpinta muodostaa taitteen rintauksen keskivaiheilla. Suunnitellun pinnan ja poraussuunnitelmapinnan ylä- ja alareunat ovat kuitenkin lähellä toisiaan. Poikkileikkauksen sijaintia suhteessa kalliorintauksen 3D-aineistoon on havainnollistettu kuvassa 33.



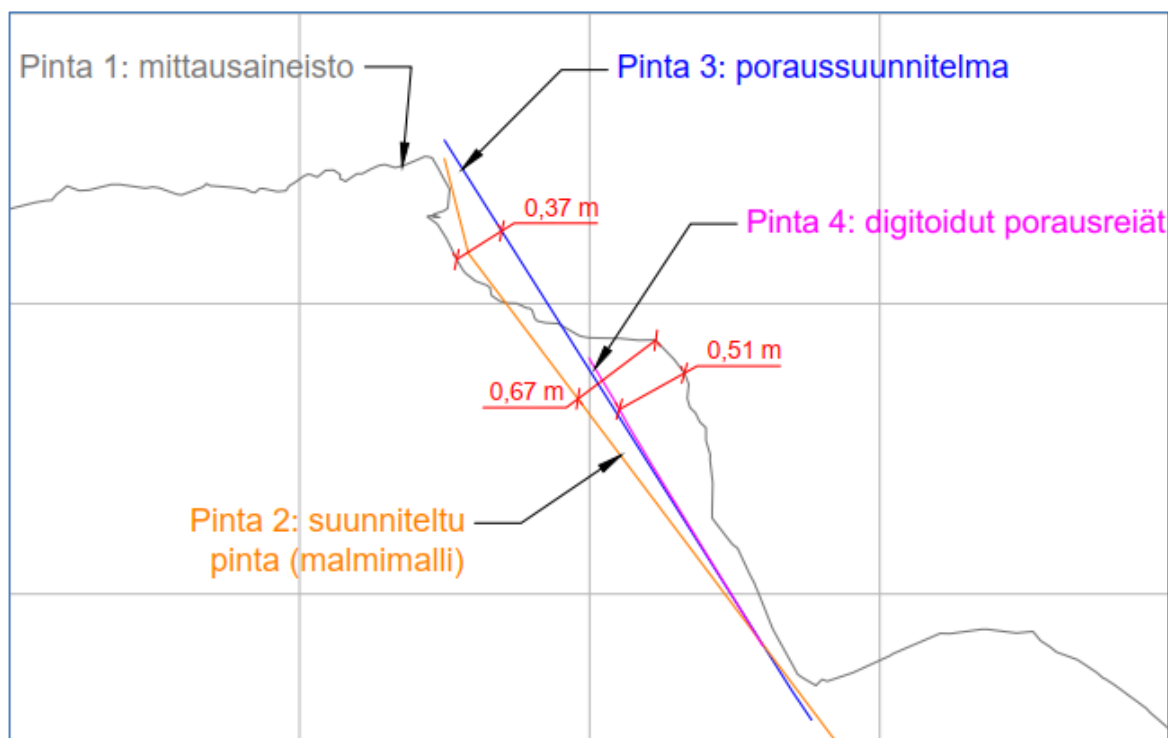
Kuva 32. Tutkimuskohde 5, leikkaus 26.



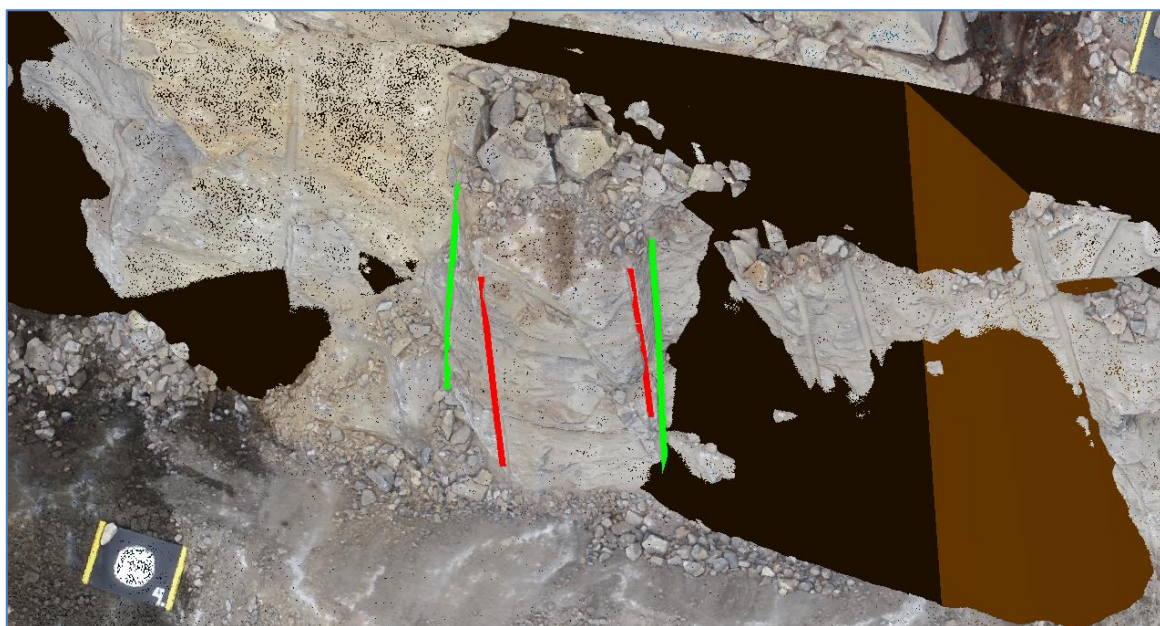
Kuva 33. Tutkimuskohde 5 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 26 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona.

Tutkimuskohde 5 poikkileikkaus 48 (kuva 34) havainnollistaa räjäytyksessä irtoamatonta kalliouloketta tarkkuuslouhintalinjan reikien välillä sekä ylilouhintaa rintauksen yläosassa verrattuna poraussuunnitelmapintaan. Pisteaineistosta digitoitujen porausreikien välille

muodostettu pinta noudattaa hyvin poraussuunnitelmaa. Suunnitellun pinnan ja poraussuunnitelmapinnan ylä- ja alareunan sijainnit vastaavat hyvin toisiaan, ja suurin kohtisuora etäisyys edellä mainittujen pintojen välillä on 0,28 metriä suunnitellun pinnan taitteessa rintauksen yläosassa. Poikkileikkauksesta on myös havaittavissa penkereen juureen muodostunut kynsi. Kuvassa 35 on esitetty alilouhittu kalliouloue sekä pisteaineistosta digitoidut raonräjäytysreiät ja kenttäreiät, joiden välinen kohtisuora etäisyys toisistaan vaihtelee välillä 0,15-0,6 metriä. Kuvassa 36 on havainnollistettu leikkauksen sijaintia suhteessa kalliorintauksesta mitattuun pisteaineistoon ja suunniteltuun tarkkuuslouhintapintaan.

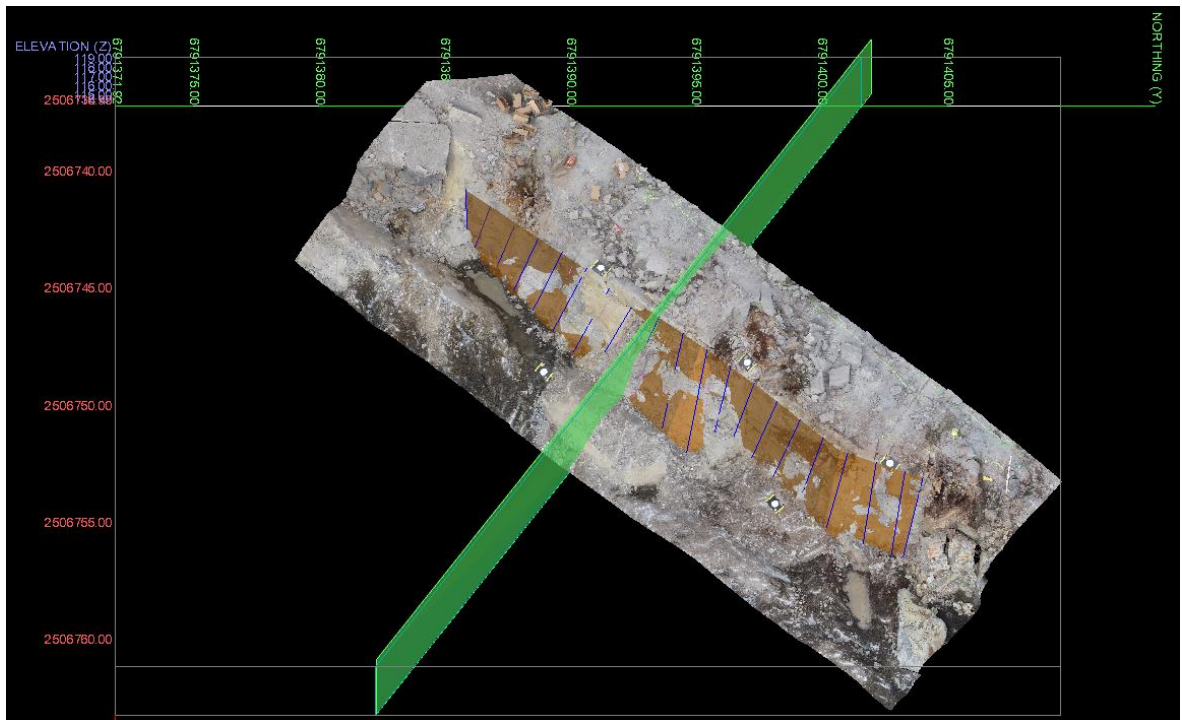


Kuva 34. Tutkimuskohde 5, leikkaus 48.



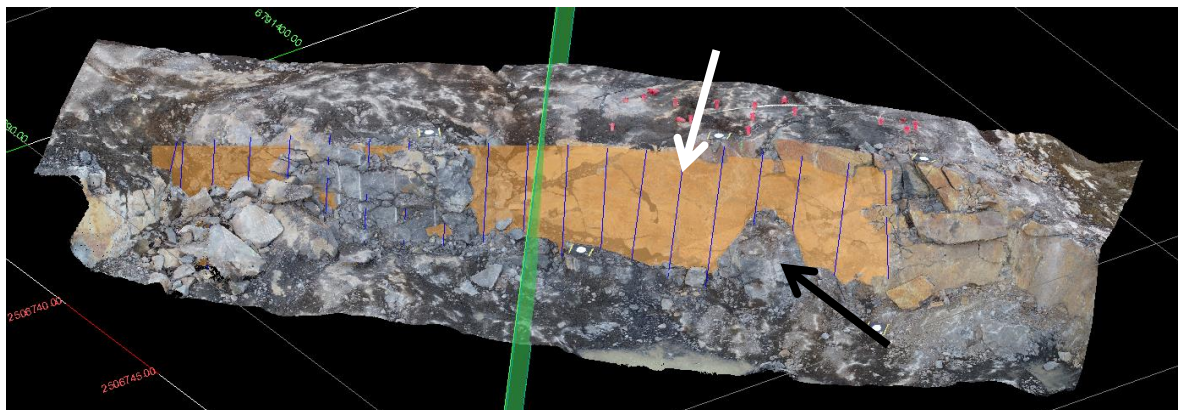
Kuva 35. Digitoidut 3D-murtoviivat pisteaineistosta havaituista raonräjäytysrei'istä (vihreä) sekä penkerlouhinnan kenttärei'istä (punainen). Ruskealla suunniteltu tarkkuuslouhintapinta.



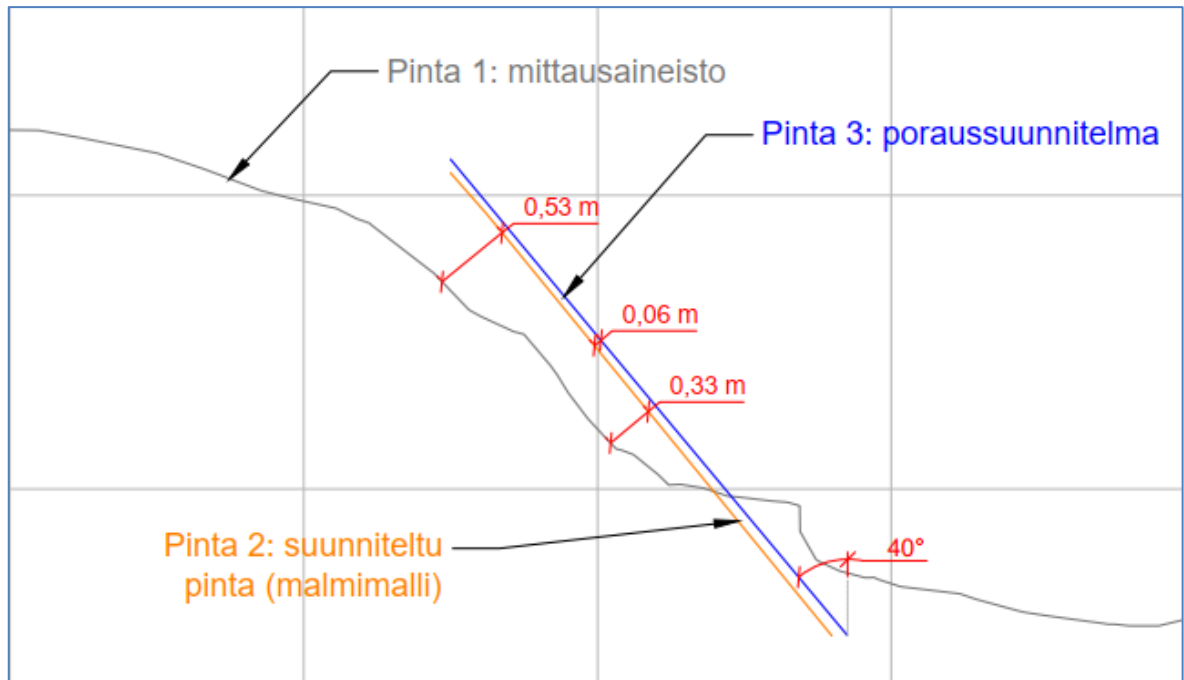


Kuva 36. Tutkimuskohteen 5 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 48 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona.

Tutkimuskohteen 6 pisteaineistoa visualisoivassa kuvassa 37 on havaittavissa noin 10 metrin pituinen ylilouhintaosuus kuvan oikealla puolella. Lisäksi ylilouhitulla alueella on havaittavissa yksi räjäytyksessä irtoamaton kalliouloke. Ylilouhittua pengerosuutta on havainnollistettu poikkileikkauksessa 59 (kuva 38). Poikkileikkauksesta on havaittavissa, että suunniteltu porauskaltevuus on 40 astetta ja pengerkorkeus keskimäärin vain 3,2 metriä. Suunniteltu pinta ja poraussuunnitelmapinta ovat yhdensuuntaisia ja pintojen välinen etäisyys on alle 0,1 metriä. Ylilouhitun kalliopinnan etäisyys suunniteltuun pintaa vaihtelee välillä 0,2-0,6 m.

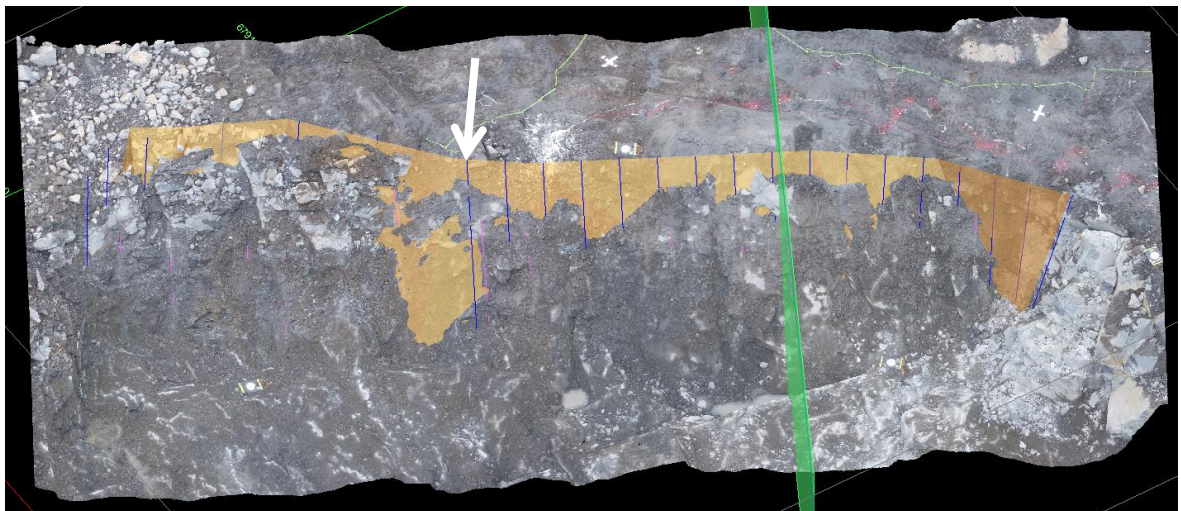


Kuva 37. Tutkimuskohteen 6 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 59 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu noin 10 metriä leveää ylilouhintaosuuden keskikohtaa ja mustalla nuolella alilouhittua kalliouloketta.

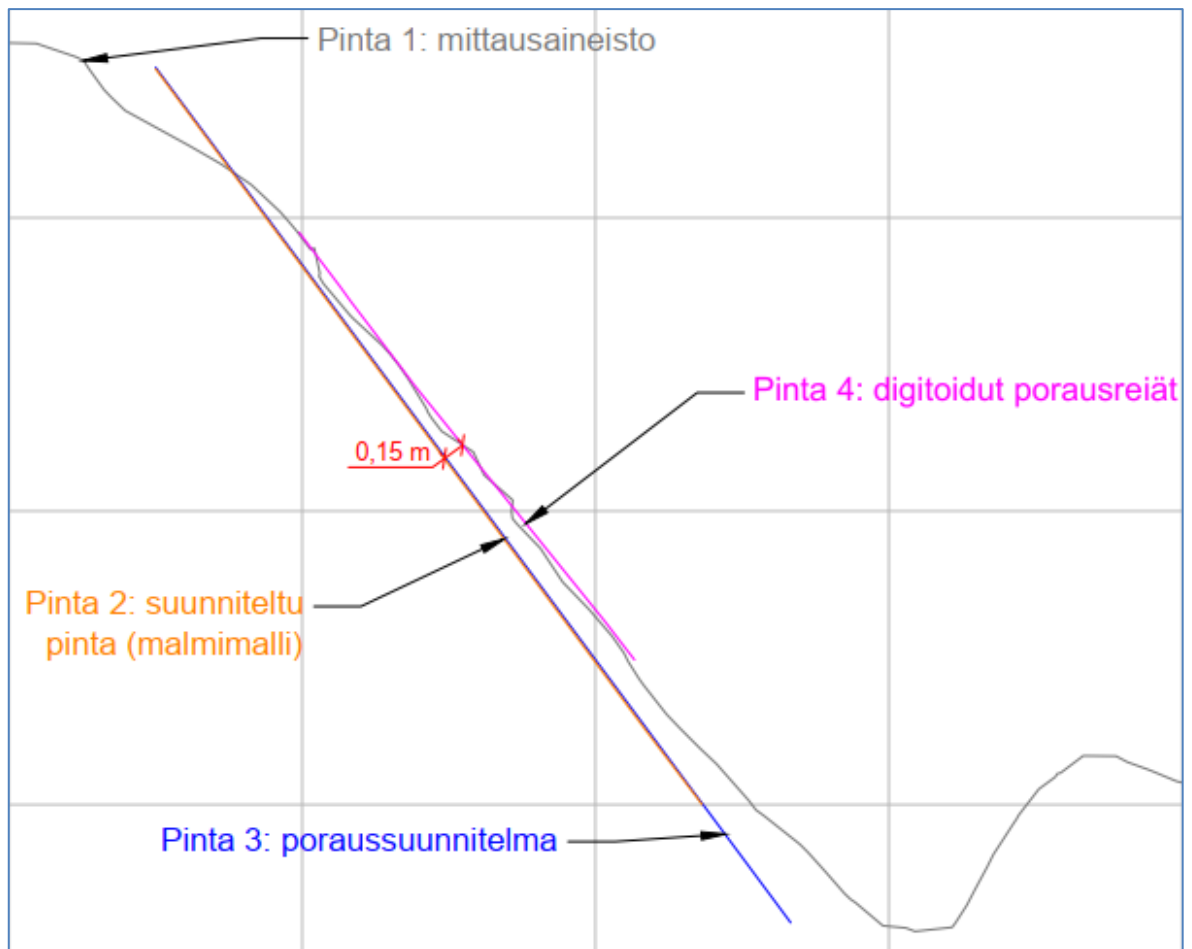


Kuva 38. Tutkimuskohde 6, poikkileikkaus 59.

Kuvassa 39 esitetyn tutkimuskohteen 13 oikealla puolella oleva 20 metrin pituinen osuus (tutkimuskohde 13.1) suoritettiin raonräjäytyksenä. Kuvaan merkitty valkoinen nuoli osoittaa tarkkuuslouhintalinjan viimeistä suunniteltua porausreikää, josta kuvan vasemmalla puolella näkyvä 10 metrin pituinen osuus (tutkimuskohde 13.2) louhittiin normaalina pengerlouhintana. Vihreänä pintana on havainnollistettu poikkileikkausta 102 (kuva 40), joka kuvaa seinämän keskimääräistä tarkkuuslouhintatulosta. Leikkauksesta havaitaan, että suunniteltu pinta ja poraussuunnitelma ovat yhteneviä. Porauksen ja seinämän etäisyysero edellä mainittuihin pintoihin on keskimäärin 0,15 m. Lisäksi louhinnan pohjatasoon jäänyt kynsi erottuu hyvin leikkauksesta.



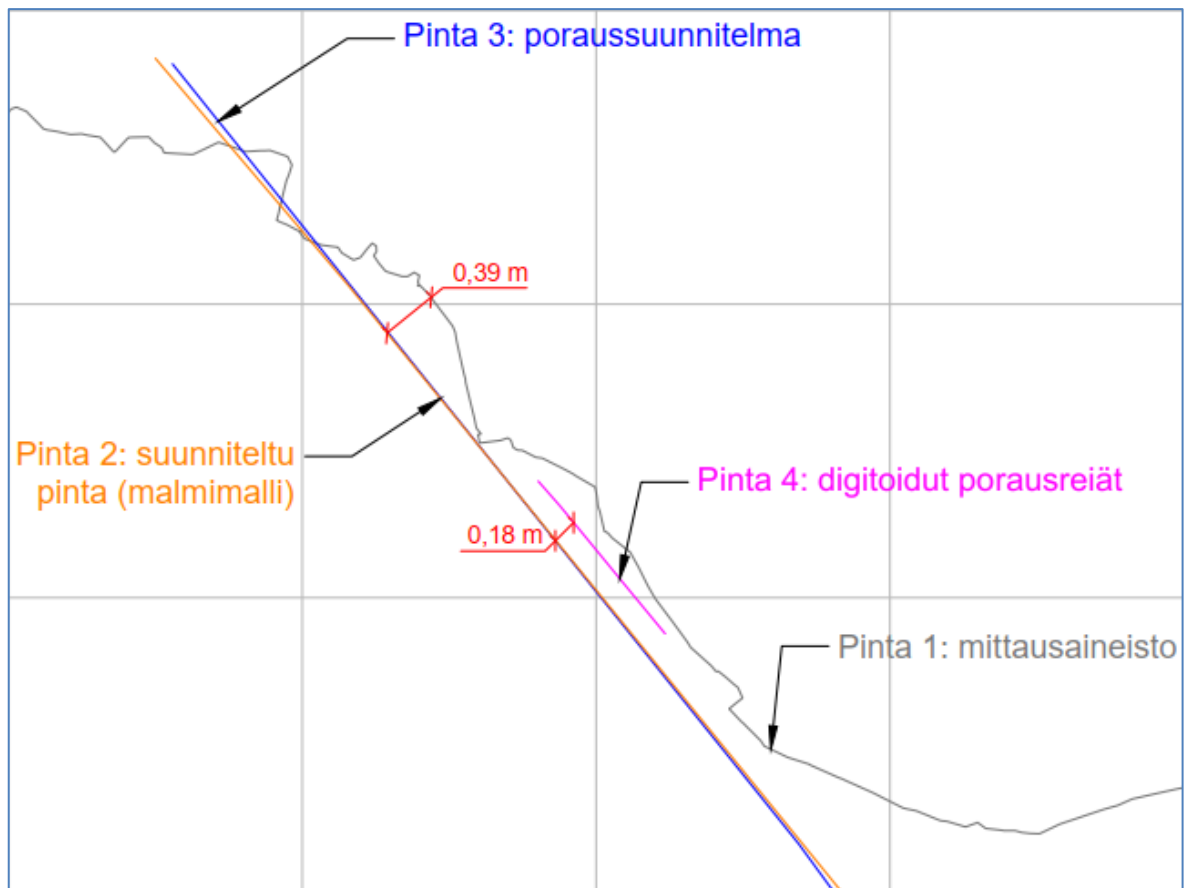
Kuva 39. Tutkimuskohteen 13 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 102 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu pengerlouhitun ja raonräjäytyksellä tuotetun seinämän raja.



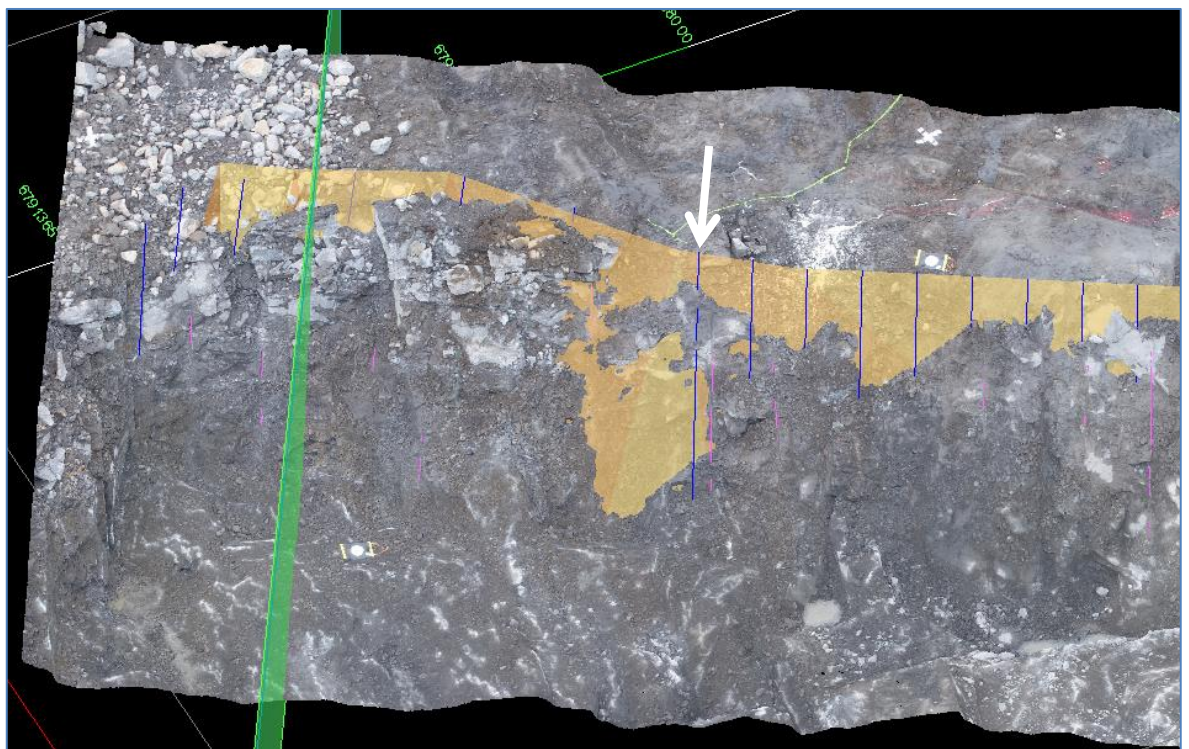
**Kuva 40. Tutkimuskohde 13.1, leikkaus 102. Tarkkuuslouhittu seinämäosuus.**

Tutkimuskohteen 13.2 poikkileikkaus on esitetty kuvassa 41 ja poikkileikkauksen sijainti kuvassa 42. Poikkileikkaus esittää seinämäosuuden keskimääräistä pengerlouhinnan toteumaa kahden vierekkäisen porausreiän keskivälillä. Leikkauksesta voidaan havaita epätasaisuutta louhitussa kallioseinämässä sekä paikoittain noin 0,3-0,4 metrin etäisyyseroa toteutuneen pinnan ja suunnitelmapintojen välillä.



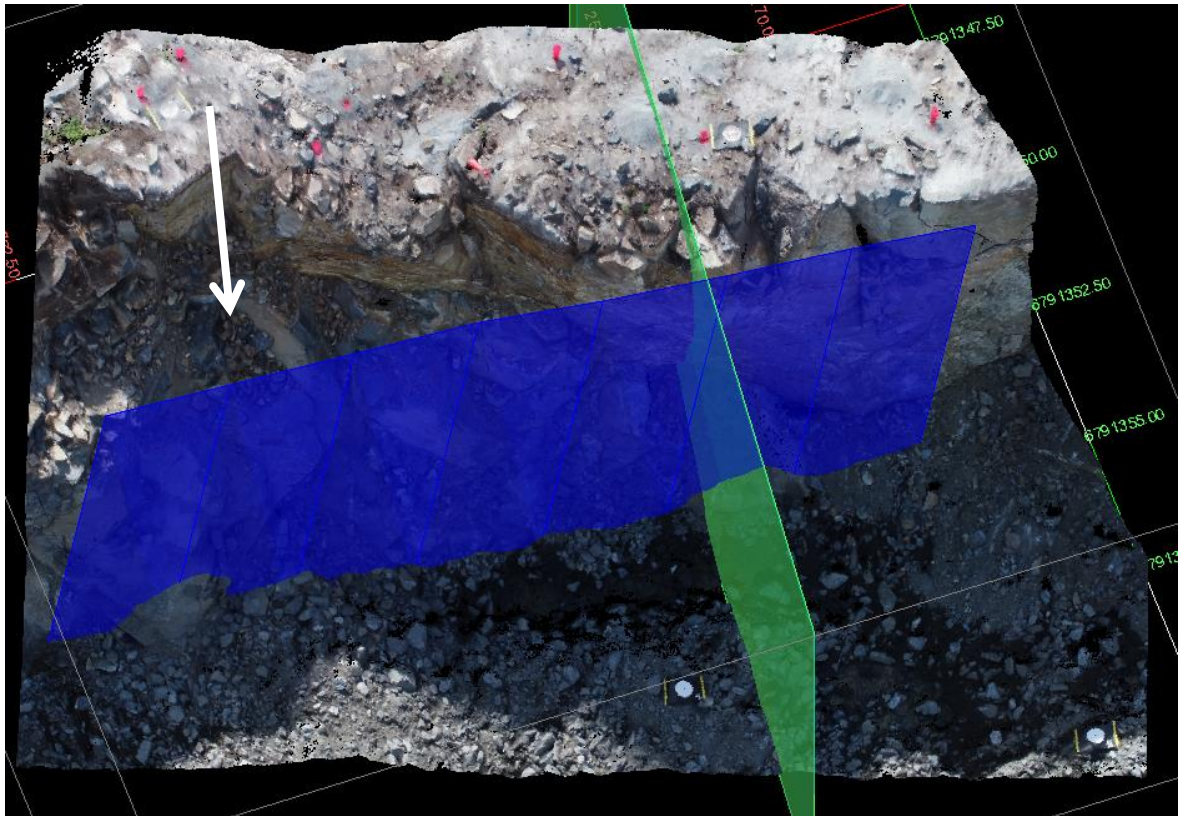


Kuva 41. Tutkimuskohde 13.2, leikkaus 10. Louhintatulos ilman raonräjäytystä.



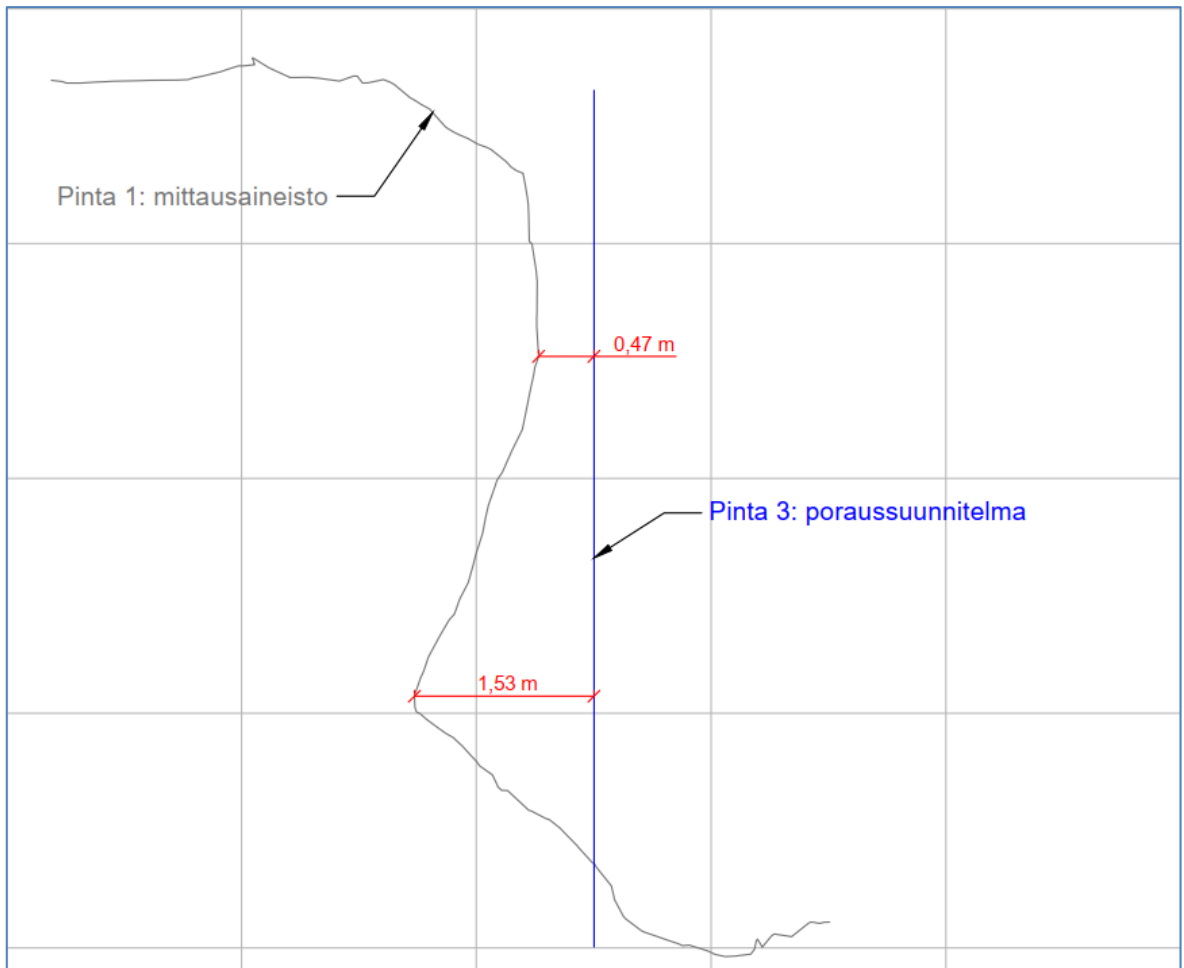
Kuva 42. Tutkimuskohteen 13.2 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 10 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu pengerrilouhitun ja raonräjäytyksellä tuotetun seinämän raja.

Kuvassa 43 on esitetty pengerlouhinnan lopputuloksena muodostunut kalliorintausta pistepilviaineistona. Kuvassa vasemmalla havaitaan suurta ylilouhintaa verrattuna sinisenä pintana havainnollistettuun louhintakentän reunimmaiseen reikäriiviin. Ero kallioseinämän ja porausrivin välillä on enimmillään kolme metriä. Seinämäosuutta, jossa kalliopinta on lähempänä reikäriiviä, on havainnollistettu poikkileikkauksessa 49 (kuva 44). Poikkileikkauksen perusteella kalliorintausten yläosan ja reikärivin välinen etäisyys on 0,47 metriä. Kalliopenkereen alaosassa puolestaan on ryöstöä, jossa kohtisuora maksimietäisyys reikäriiviin on 1,53 metriä.



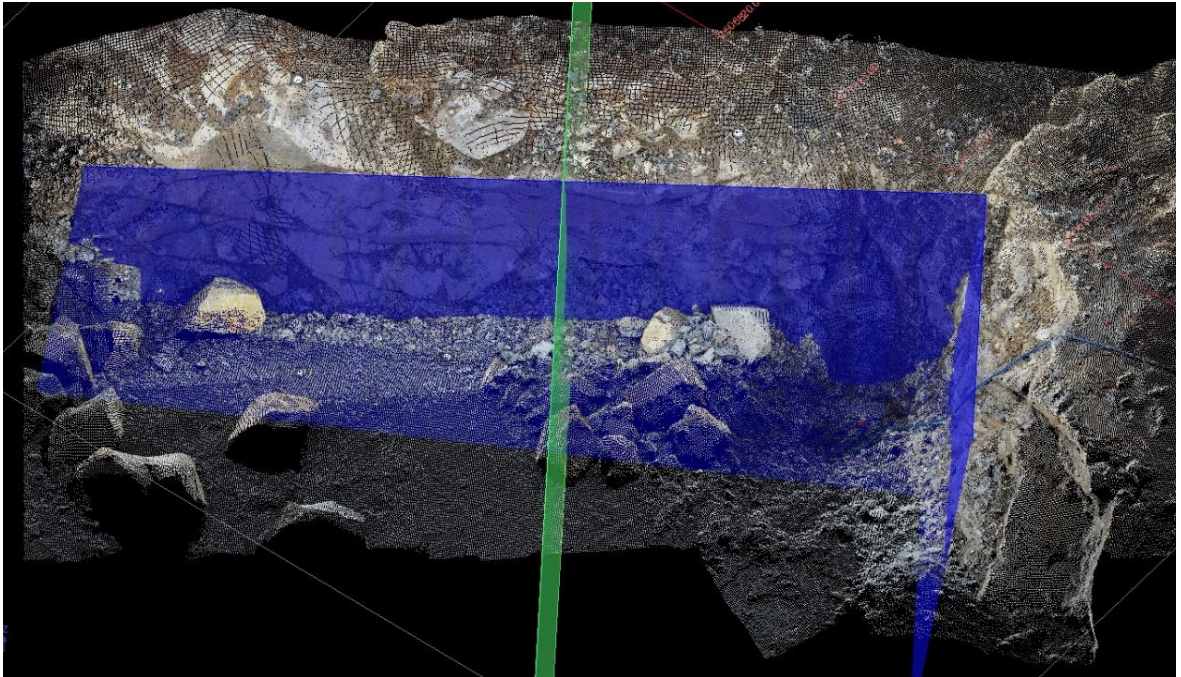
Kuva 43. Tutkimuskohteen 14 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 49 sijainti on esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona. Valkoisella nuolella on osoitettu ylilouhintaa kalliopenkereessä.



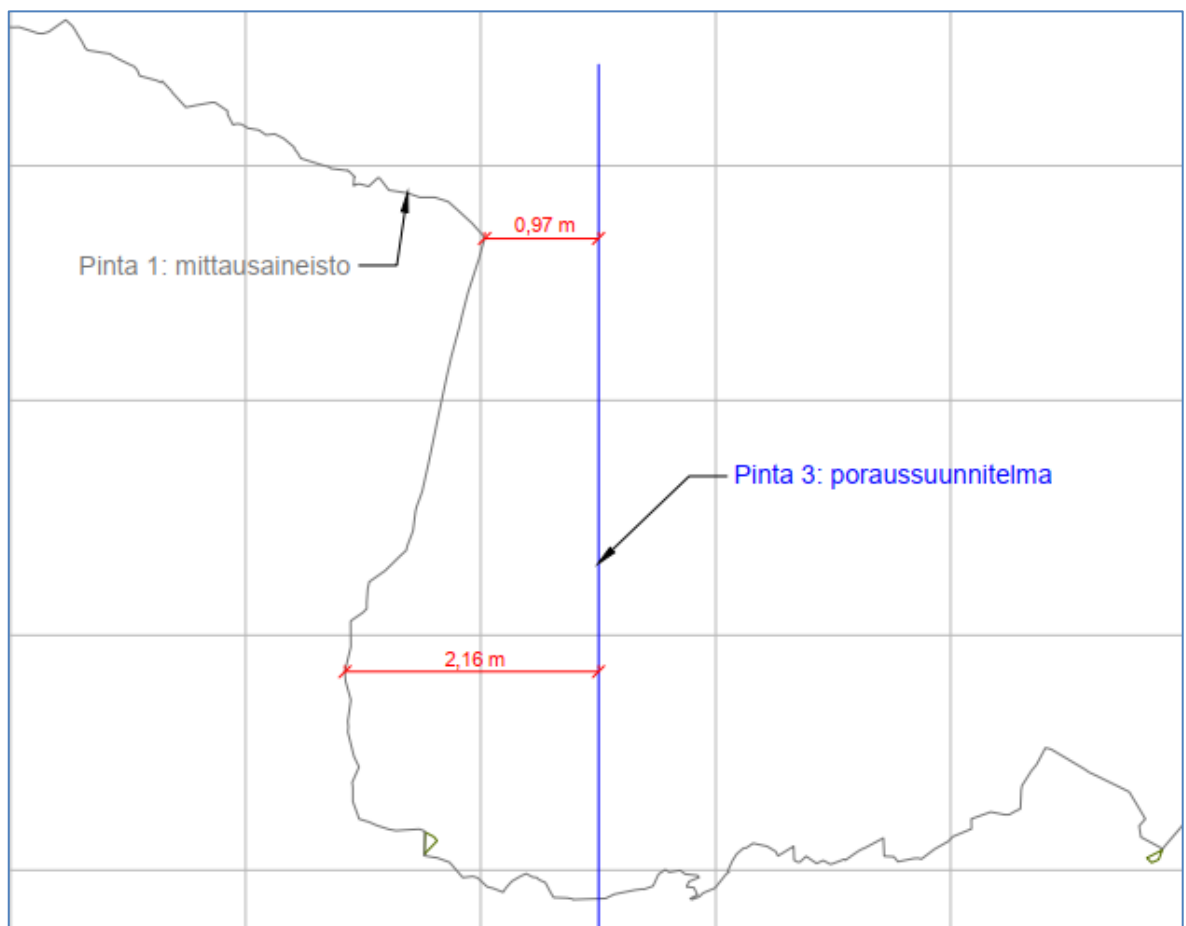


Kuva 44. Tutkimuskohde 14, leikkaus 49.

Myös pengerlouhitun tutkimuskohteen 15 pisteaineistosta (kuva 45) ja poikkileikkauksesta (kuva 46) havaitaan huomattavaa ylilouhintaa. Poikkileikkaus edustaa kalliorintauksen keskimääräistä louhintatulosta. Poikkileikkauksen perusteella pienin etäisyys on 0,97 m rintauksen yläosassa ja suurin 2,16 m rintauksen alareunasta ryöstäneessä kohdassa.



Kuva 45. Tutkimuskohteen 15 kolmiulotteinen mittaus- ja suunnitteluaineisto Surpac-ohjelmistossa. Leikkauksen 82 sijainti esitetty vihreänä pystysuuntaisena tasona.



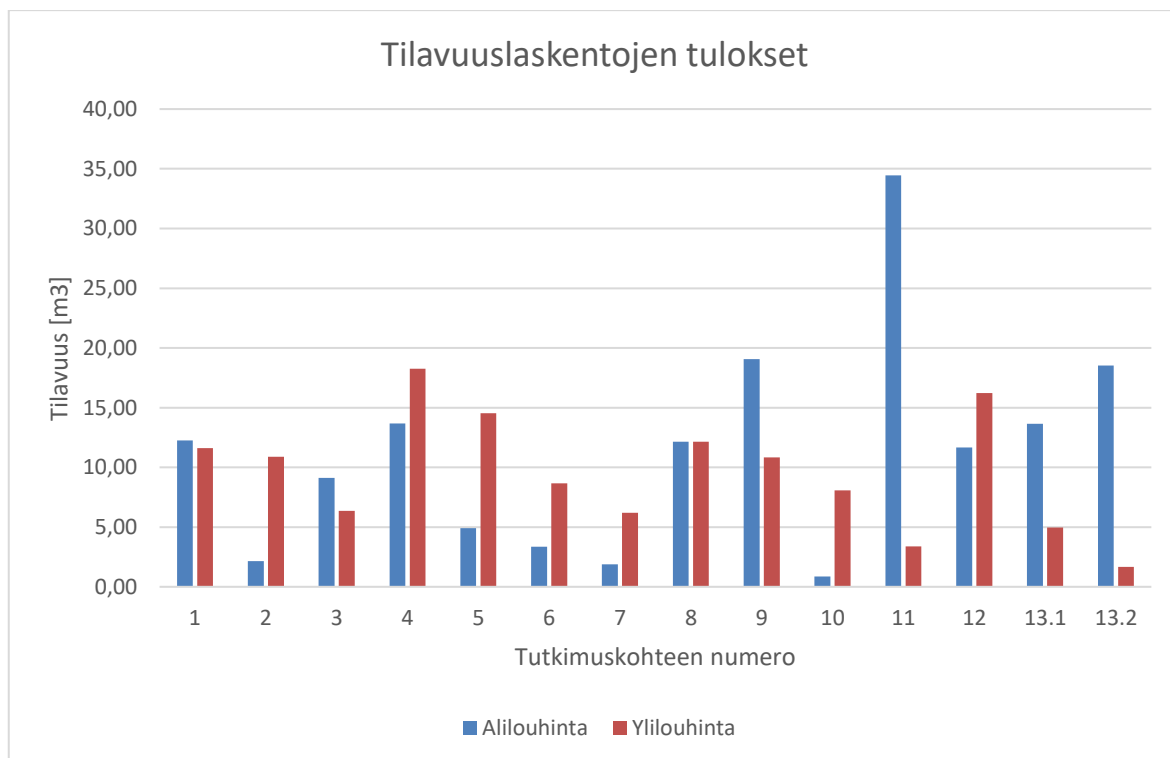
Kuva 46. Tutkimuskohde 15, leikkaus 82.

## 6.2 Tilavuuslaskenta

Tarkkuuslouhittujen kallioseinämiä mittaustulosten sekä suunniteltujen malmin ja sivukiven kontaktipintojen väliset tilavuuslaskentatulokset on esitetty taulukossa 2. Taulukossa on esitetty lasketut ali- ja ylilouhintojen tilavuudet, ali- ja ylilouhintoja vastaavat malmitappion ja sivukivilaimennuksen määrät kuutiometreinä ja tonneina sekä pinta-ala, jonka suuruusalueelta tilavuuslaskenta on suoritettu. Alilouhinnan ja ylilouhinnan määriä on myös havainnollistettu pylväskaaviona kuvassa 47.

**Taulukko 2. Tutkimuskohteiden 1-13.2 tilavuuslaskentojen tulokset sekä ali- ja ylilouhintatilavuuksia vastaavat malmitappion ja sivukivilaimennuksen määrät.**

Tutkimuskohde	2D-laskenta- pinta-ala	Ali- louhintaa	Yli- louhintaa	Malmitappio		Sivukivilaimennus	
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[tn]	[m <sup>3</sup> ]	[tn]
1	78,30	12,26	11,62	12,26	34,58	11,62	32,77
2	65,26	2,16	10,90	2,16	6,09	10,90	30,73
3	54,44	9,12	6,35	9,12	25,71	6,35	17,91
4	107,30	13,68	18,26	18,26	51,49	13,68	38,56
5	89,39	4,92	14,53	4,92	13,88	14,53	40,97
6	57,21	3,37	8,67	8,67	24,44	3,37	9,50
7	49,68	1,88	6,19	1,88	5,29	6,19	17,46
8	100,33	12,15	12,14	12,14	34,22	12,15	34,25
9	124,13	19,06	10,84	10,84	30,56	19,06	53,76
10	43,25	0,86	8,07	0,86	2,43	8,07	22,75
11	147,06	34,44	3,39	34,44	97,12	3,39	9,55
12	135,75	11,66	16,22	16,22	45,74	11,66	32,87
13.1	103,72	13,65	4,98	13,65	38,50	4,98	14,04
13.2	72,97	18,54	1,68	18,54	52,29	1,68	4,74
Keskiarvo (1-13.1)	88,91	10,71	10,16	11,19	31,54	9,69	27,32
Mediaani (1-13.1)	89,39	11,66	10,84	10,84	30,56	10,90	30,73
Keskihajonta (1-13.1)	34,15	9,10	4,45	8,89	25,08	4,74	13,38



Kuva 47. Tilavuuslaskentojen tuloksia havainnollistettu pylväskaaviona.

Tarkkuuslouhittujen tutkimuskohteiden 1-13.1 tuloksista havaitaan, että yhteensä 13 tuloksesta seitsemässä on määrällisesti enemmän ylilouhintaa (tutkimuskohteet 2, 4, 5, 6, 7, 10 ja 12), neljässä enemmän alilouhintaa (tutkimuskohteet 3, 9, 11 ja 13.1) ja kahdessa tutkimuskohteessa yli- ja alilouhintatilavuudet ovat lähes yhtä suuret eron ollessa alle 1 m<sup>3</sup> (tutkimuskohteet 1 ja 8).

Alilouhintatulosten keskiarvo on 5 % ja mediaani 8 % suurempi kuin ylilouhintatulosten vastaavat arvot. Pylväskaaviosta havaitaan tutkimuskohteen 11 alilouhintatilavuuden olevan huomattavasti muita tuloksia suurempi, mikä kasvattaa alilouhintatuloksista laskettua keskiarvoa. Mikäli tutkimuskohde 11 rajataan laskennan ulkopuolelle, alilouhinnan keskiarvo on 11 % ja mediaani 4 % pienempi kuin ylilouhintatulosten vastaavat arvot.

Ilman raonräjäytystä louhitun tutkimuskohteen 13.2 alilouhinnan laskettu tilavuus (18,54 m<sup>3</sup>) on merkittävästi suurempi kuin ylilouhinnan tilavuus (1,68 m<sup>3</sup>). Myös saman kalliorintauksen tarkkuuslouhitussa osuudessa alilouhinnan laskettu määrä on suurempi.

Tarkkuuslouhittujen tutkimuskohteiden malmitappion keskiarvo on 11,19 m<sup>3</sup> (31,54 tn) ja sivukivilaimennuksen keskiarvo 9,69 m<sup>3</sup> (27,32 tn). Edellä mainittujen tulosten mediaanit ovat 10,84 ja 10,90. Malmitappion keskiarvoon vaikuttaa kasvattavasti tutkimuskohteen 11 suuri alilouhintamäärä.

Taulukossa 3 on esitetty ali- ja ylilouhintojen tilavuuksien suhde laskentapinta-alaan. Suhdeluvun avulla yli- ja alilouhintamääriä voidaan tutkimuskohteiden välillä vertailla, kun mitauskohteiden laajuus otetaan tuloksissa huomioon. Suhdeluku havainnollistaa kuvitteellista tilannetta, jossa tutkimuskohteesta laskettu ali- tai ylilouhinnan kokonaismäärä on jaoteltu tasaisesti koko laskentapinta-alalle. Suhdeluku 1 vastaa siten 1 m<sup>3</sup> suuruista yli- tai alilouhintaa yhden neliömetrin alueelta.

**Taulukko 3. Ali- ja ylilouhinnan suhde laskentapinta-alaan.**

Tutkimuskohde	Alilouhinta/ pinta-ala [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	Ylilouhinta/ pinta-ala [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]
1	0,16	0,15
2	0,03	0,17
3	0,17	0,12
4	0,13	0,17
5	0,06	0,16
6	0,06	0,15
7	0,04	0,12
8	0,12	0,12
9	0,15	0,09
10	0,02	0,19
11	0,23	0,02
12	0,09	0,12
13.1	0,13	0,05
13.2	0,25	0,02
Keskiarvo (1-13.1)	0,11	0,13
Mediaani (1-13.1)	0,12	0,12

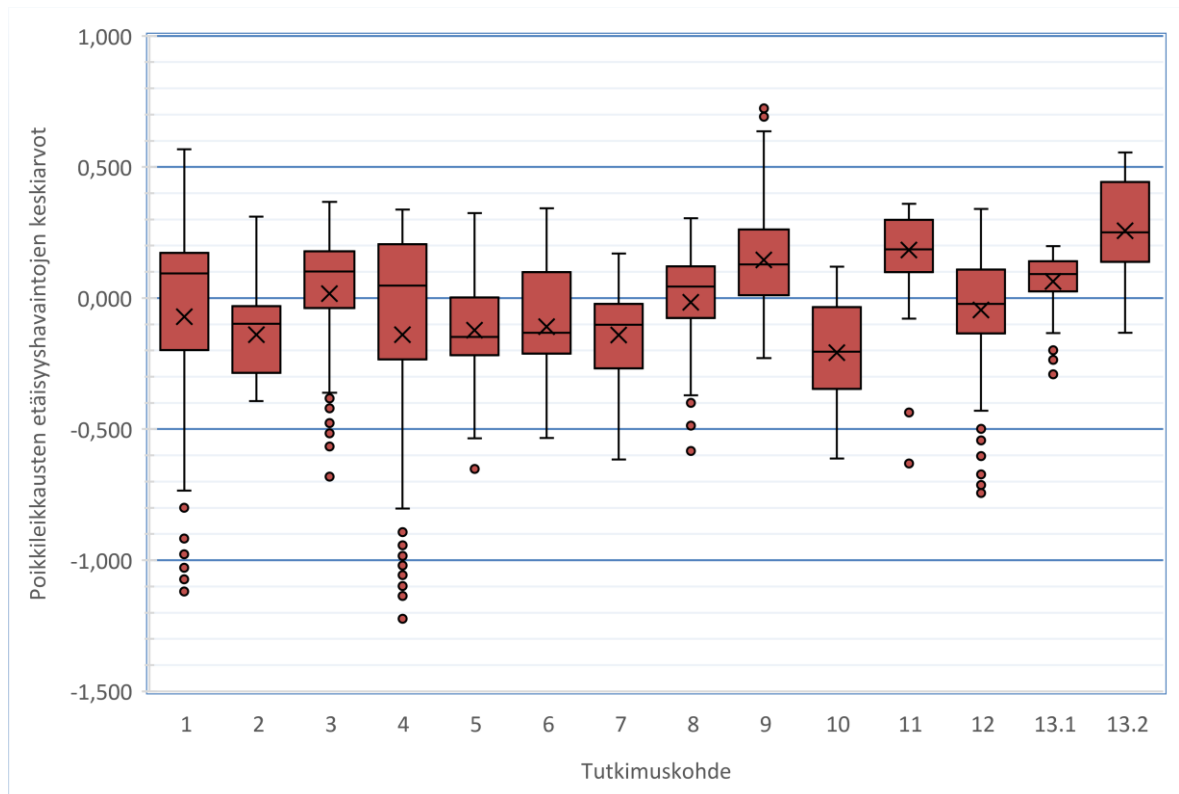
Taulukossa 3 esitetyistä suhdeluista havaitaan, että tutkimuskohteista laskettu ali- ja ylilouhinnan keskiarvot ja mediaanit ovat lähes samansuuruisia ylilouhinnan keskiarvon ollessa 0,02 yksikköä alilouhintaa suurempi.

Tutkimuskohteiden 11 ja 13.2 alilouhinnan suhdelukujen havaitaan olevan muita tuloksia suurempia.

### **6.3 Etäisyysseromittaukset poikkileikkausmenetelmällä**

3D-reshaper ohjelmistolla suoritettiin tutkimuskohteista etäisyysseromittauksia 20 cm välein muodostetuista poikkileikkauksista. Kohtisuorat etäisyysserot laskettiin suunnitellun ja toteutuneen kalliopinnan välillä ja tuloksena saatiin jokaiselle poikkileikkaukselle etäisyyshavaintojen keskiarvo. Negatiiviset etäisyyshavainnot edustivat ylilouhintaa ja positiiviset alilouhintaa.

Poikkileikkausten etäisyyshavaintojen keskiarvotulokset on esitetty ruutu- ja janakaaviona kuvassa 48. Poikkileikkauksen negatiivinen etäisyyshavaintojen keskiarvo edustaa tilannetta, jossa poikkileikkauksen kohdalla on enemmän ylilouhintaa kuin alilouhintaa, ja vastaavasti positiivinen keskiarvo edustaa alilouhinnan suurempaa määrää leikkauksessa. Ruutu- ja janakaaviossa havainnollistetuista tunnusluvuista mediaanin ja keskiarvon lukuarvot on esitetty taulukossa 4.



**Kuva 48.** Poikkileikkausten etäisyysseromittausten keskiarvotulokset ruutu- ja janakaaviona. Janan päät kuvaavat poikkileikkausten keskiarvotulosten minimi- ja maksimiarvoja, ruudun sisällä oleva vaakaviiva kuvaa mediaania ja risti keskiarvoa sekä ruudun ala- ja yläreuna tulosten ala- ja yläneljänneistä, joiden välillä on 50 % tuloksista. Janan ulkopuoliset pisteet kuvaavat tuloksista poikkeavia arvoja.

**Taulukko 4.** Tutkimuskohteiden etäisyysserotulosten keskiarvot ja mediaanit.

Tutkimus- kohde	Keskiarvo	Mediaani
1	-0,071	0,095
2	-0,139	-0,098
3	0,017	0,102
4	-0,140	0,047
5	-0,123	-0,148
6	-0,109	-0,132
7	-0,141	-0,102
8	-0,016	0,044
9	0,146	0,129
10	-0,208	-0,205
11	0,184	0,185
12	-0,045	-0,023
13.1	0,063	0,092
13.2	0,256	0,251

Tutkimuskohteissa 3, 9, 11, 13.1 ja 13.2 sekä poikkileikkausmittaustulosten mediaani että keskiarvo ovat positiivisia. Tulosten perusteella kyseisissä tutkimuskohteissa esiintyy enemmän alilouhintaa verrattuna ylilouhintaan. Tutkimuskohteissa 2, 5, 6, 7, 10 ja 12 mediaani ja keskiarvo ovat molemmat negatiivisia, mikä viittaa ylilouhinnan suurempaan määrään.

## 7 Tulosten analysointi ja pohdinta

### 7.1 Päätelmät poikkileikkauksista ja visuaalisista havainnoista

3D-aineistoista tehtyjen visuaalisten havaintojen ja poikkileikkausten perusteella voidaan päätellä, että tarkkuuslouhintalinjojen jyrkissä käänöksissä optimaalisen louhintatuloksen saavuttaminen on haasteellista. Tutkimuskohteista 1 (kuva 24) ja 3 (kuva 28) tehdyt havainnot osoittavat, että kallio rikkoutuu keskimääräistä enemmän kyseisissä rakolinjan taiteipisteissä muodostaen ylilouhintaa.

Tutkimuskohteen 1 poikkileikkauksen 78 (kuva 25) perusteella voidaan todeta poraus suunnittelun ja poraustarkkuuden onnistuneen hyvin kyseisessä kohdassa. Lisäksi tarkkuuslouhinnan toteutunut kallionpinta on lähellä digitoitujen porausten välille muodostettua pintaa. Leikkauksessa alilouhintaa eli malmitappiota ei ole havaittavissa kuin pieni määrä seinämän alareunassa. Poikkileikkaus on esimerkki hyvästä louhintatuloksesta malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumisen kannalta.

Tutkimuskohteen 2 leikkauksen 71 (kuva 27) kohdalla ylilouhintaa kallioseinämässä on muodostunut osittain geologisten olosuhteiden vaikutuksesta, sillä pisteaineiston perusteella on havaittavissa sortumisen mahdollistava rakopinta. Vastaavanlaisia ruuhkeiden ja heikkousvyöhykkeiden aiheuttamia ongelmia louhintatuloksessa on havaittavissa esimerkiksi tutkimuskohteiden 1 (kuva 24, kalliolouhe vasemmalla) ja 4 (kuva 30, ylilouhintaa vasemmalla) pistepilviaineistoista. Myös kuvat 37 ja 38 tutkimusaineistosta 6 havainnollistavat kallion geologisten ominaisuuksien vaikutusta tarkkuuslouhintatulokseen. Kuvan 37 oikealla puolella on selvästi havaittavissa luonnollinen rakopinta, jota pitkin kallio on irronnut räjäytyksessä. Leikkauksesta 59 (kuva 38) voidaan havaita raon aiheuttamaa ylilouhintaa. Avo-louhoksesta suoritettujen tutkimuskairausten väliin jääviä kallion paikallisia geologisia ominaisuuksia ja niiden vaikutusta louhintatulokseen on vaikea etukäteen määrittää, sillä tarkkuuslouhittava kallioseinämäosuus ei myöskään ole visuaalisesti kartoitettavissa ennen raonräjäytyksen toteuttamista.

Tutkimuskohteen 2 leikkaus 71 (kuva 27) havainnollistaa lisäksi tilannetta, jossa 3D-aineistojen poikkileikkaustarkastelussa todettu ylilouhintahavainto voidaan hyödyntää seuraavan louhintakentän poraus- ja panostussuunnittelussa. Ryöstön huomioon ottaminen ensimmäisen porausrivin etua määritettäessä sekä räjähdysainetyyppejä valittaessa parantaa louhinnan turvallisuutta vähentämällä kivien sinkoiluriskiä. Myös tutkimuskohteiden 14 ja 15 leikkaukset 49 (kuva 44) sekä 82 (kuva 46) havainnollistavat vastaavanlaisia kohteita, joissa poikkileikkaustarkastelu tuo lisätietoa poraus- ja panostussuunnitteluun.

Tutkimuskohteen 3 leikkauksesta 31 (kuva 29) voidaan todeta porauksen ja tarkkuuslouhinnan onnistuneen hyvin rikkonaisesta kallioista huolimatta. Porauksessa ei voi kuitenkaan olla samanlaista taitetta kuin malmimallin mukaisessa seinämäpinnassa, mikä aiheuttaa jonkin verran alilouhintaa eli kyseisessä tutkimuskohteessa malmitappiota. Mittausaineiston avulla malmitappio kuitenkin pystyttiin havaitsemaan ennen seuraavaa räjäytystä, ja malmitappiota pyrittiin vähentämään irrottamalla irtotoukat kalliolohkareet seinämästä ja viemällä ne malmille tarkoitettulle välivarastointikasilalle.



Tutkimuskohteen 4 poikkileikkauksen 50 (kuva 31) kohdalla raonräjäytyksen voidaan todeta onnistuneen kohtuullisen hyvin, sillä rakolinjan reikien puolikkaat ovat pisteaineistosta havaittavissa ja reikien välisessä kallionpinnassa ei ole merkittävää epätasaisuutta. Poikkileikkauksen perusteella voidaan kuitenkin havaita, että hyvästä tarkkuuslouhintatuloksesta ja yhdensuuntaisista pinnoista huolimatta poraussuunnitelman ja toteutuneen porauksen sijainnit poikkeavat suunnitellusta pinnasta. Noin 0,3 metrin etäisyys ero porauksen ja suunnitellun pinnan välillä ei yksittäisenä poikkeamana vielä merkittävästi vaikuta massamääriin. Mikäli poikkileikkauksen esittämä tilanne kuitenkin toteutuu systemaattisesti esimerkiksi  $20\text{ m} \times 5\text{ m}$  suuruisella seinämäosuudella, olisi alilouhinnan eli tässä tapauksessa sivukivilaimennuksen määrä laskennallisesti  $20\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0,3\text{ m} = 30\text{ m}^3\text{ ktr}$  eli noin  $30\text{ m}^3 \times 2,82\text{ tn/m}^3 = 84,6\text{ tonnia}$ . Kyseinen massamäärä on yli 1,5-kertainen yhden puoliperävaunun yhdistelmän kuljetuskapasiteettiin verrattuna ja aiheuttaa siten huomattavasti ylimää räisiä kuljetuskustannuksia.

Tutkimuskohteen 5 leikkaus 26 (kuva 32) havainnollistaa seinämäosuutta, jossa suunnitellun ja toteutuneen porauksen välinen poikkeama aiheuttaa poraussuunnitelmaan verrattuna huomattavaa ylilouhintaa. Raonräjäytyksen päätellään onnistuneen hyvin, sillä reikien puolikkaat on pistepilviaineistosta havaittavissa, ja kallioseinä on digitoitujen porausreikien suuntainen. Suunniteltu tarkkuuslouhintapinta muodostaa taitteen rintauksen keskivaiheilla. Taite on kuitenkin toteutuneen seinämän suuntaan, mikä vähentää porausvirheestä johtuvaa ylilouhinnan määrää. Poikkileikkauksen kuvaamasta tilanteesta voidaan kuitenkin päätellä, että poraustarkkuudella on merkittävä vaikutus yli- ja alilouhinnan muodostumisessa.

Tutkimuskohteen 5 leikkaus 48 (kuva 34) esittää tilannetta, jossa raonräjäytys ei ole onnistunut halutulla tavalla. Tarkkuuslouhintareikien väliin on jäänyt irtoamaton kalliolouke, ja rintauksen yläosassa on puolestaan havaittavissa ryöstöä suunniteltuihin porausreikiin verrattuna. Raonräjäytyksen epäonnistumiseen on useita mahdollisia syitä. Yksi mahdollinen syy on, että kalliorintauksen yläosasta irronnut kallioblokki on liikahtanut ruhjeen suuntaisesti ja katkaissut reiän panoksen ennen kuin räjähdys on välittynyt reiän pohjalle asti. Toinen vaihtoehto on, että räjähdyskaasujen paine on purkautunut olemassa olevia rakoja pitkin, jolloin raon muodostuminen reikien välille on epäonnistunut. Pisteaineiston tarkastelulla kuitenkin havaitaan (kuva 35), että irtoamattomassa kallioloukkeessa on näkyvissä pengelouhinnan kenttäreikien puolikkaita. Todennäköisin vaihtoehto raonräjäytyksen epäonnistumiseen on, että pengelouhinnan kenttäreikien ja tarkkuuslouhintalinjan välinen etu on ollut liian pieni. Rako ei siten ole muodostunut raonräjäytyksessä tarkkuuslouhintareikien välille, vaan lähempänä sijaitseviin pengelouhinnan kenttäreikiin.

Tutkimuskohteen 13.1 leikkaus 102 (kuva 40) kuvaa tarkkuuslouhitun kallioseinäosuuden keskimääräistä louhintatulosta, ja 13.2 leikkaus 10 (kuva 41) vastaavasti saman kallioseinämän osuutta, jossa testattiin louhintaa ilman raonräjäytystä. Leikkauksia visuaalisesti vertailemalla havaitaan, että tarkkuuslouhittu kallionpinta leikkauksessa 102 noudattelee hyvin digitoitujen porausreikien välille muodostettua pintaa, kun taas normaalilla pengelouhinnalla tuotettu kallionpinta leikkauksessa 10 on epätasainen ja poikkeaa tarkkuuslouhittua seinämää enemmän toteutuneista porausrei'istä. Leikkausten vertailun perusteella raonräjäytys on tuottanut paremman louhintatuloksen kuin pelkkä pengelouhintaa.

Tutkimuskohteet 14 ja 15 edustavat pengerlouhittujen sivukivikenttien kallioseinämien louhintatulosta. Kohteen 14 esimerkkipoikkileikkauksessa 49 (kuva 44) ja kohteen 15 leikkauksessa 82 (kuva 46) kohtisuorat etäisyydet kalliorintauksen ja suunniteltujen porausreikien välillä vaihtelevat noin 0,5 metristä yli 1,5 metriin. Kyseiset ylilouhintaa kuvaavat etäisyyspoikkeamat ovat keskimäärin huomattavasti suurempia kuin missään muissa aiemmin esitetyistä tarkkuuslouhintatuloksia kuvaavissa leikkauksissa. Mitattujen etäisyyserojen perusteella voidaan todeta, että vastaavanlainen pengerlouhintaa ilman tarkkuuslouhintaa ei ole soveltuva tarkkaa louhintatulosta vaativiin malmin ja sivukiven välisiin louhintoihin.

Raonräjäytysmenetelmällä ja 1,2 metrin reikävälillä suoritettujen tarkkuuslouhinta-eräjäytysten voidaan päätellä onnistuneen pääasiallisesti hyvin, sillä useimmissa tutkimuskohteissa raonräjäytysreikien puolikkaista on pistepilviaineistosta havaittavissa (kuvat 24, 30 ja liitteet 1, 2, 4, 5 sekä 7-13), ja rako on selvästi muodostunut reikien välille. Kuitenkin pienistäkin systemaattisista virheistä tarkkuuslouhintalinjan suunnitellun ja toteutuneen sijainnin välillä saattaa aiheutua merkittäviä määriä yli- tai alilouhintaa.

Kuvissa 27, 29, 32 ja 34 esitetyistä poikkileikkauksista havaitaan, että porausreiät on suunniteltu vastaamaan suunnitellun tarkkuuslouhintapinnan ylä- ja alareunan taiteviivaraajoja. Suunnitellun tarkkuuslouhintapinnan kolmioverkko muodostaa kyseisissä kohdissa taitteen, jota ei porauksessa ole mahdollista toteuttaa. Suunnitellun pinnan taitteiden vaikutuksessa muodostuu siten usein yli- tai alilouhintaa.

Tutkimuskohteista havaittiin, että kalliorintauksen harjaan muodostuu usein ylilouhintaa ja vastaavasti rintauksen juureen alilouhintaa (kuvat 25 ja 40). Rintauksen harjaan muodostuvan ylilouhinnan mahdollisia syitä ovat esimerkiksi

- kallion suurempi rikkonaisuus pintaosassa
- etutäytteen käyttö, millä on taipumus lohkaista kalliota reiän yläosasta sekä
- räjäytyksen jännitysaaltojen takaisinheijastuminen kallion pinnasta ja siten vetojännitysten aiheuttama kallion suurempi rikkoutuminen lähellä pintaa.

Rintauksen juureen muodostuvan alilouhinnan sekä louhintakentän pohjanosaan muodostuvien kynsien (kuvat 32, 34 ja 40) mahdollisia syitä ovat esimerkiksi

- kallion geologiset ominaisuudet, kuten raot ja ruhjeet
- liian pieni ominaispanostus reikien pohjaosassa
- riittämätön ohiporaus tai liiallinen määrä poraussoijaa reikien pohjalla
- epäsopiva etu rivien välillä
- suuret porauskaltevuudet.

Lisäksi rintauksen juuressa esiintyy poikkileikkausten perusteella alilouhintaa, kun juurta ei ole kaivettu kunnolla puhtaaksi räjäytetystä kiviaineksesta.

## **7.2 Tilavuuslaskentatulosten analyysi**

Tilavuuslaskentojen perusteella yhteensä 13 tarkkuuslouhitusta tutkimuskohteesta seitsemässä eli 54 %:ssa on selvästi enemmän ylilouhintaa kuin alilouhintaa, ja vastaavasti alilouhintaa on enemmän neljässä eli 31 %:ssa kohteista. Tulokset viittaavat, että tutkituissa kalliorintauksissa esiintyy useammin enemmän yli- kuin alilouhintaa.

Kaikista tarkkuuslouhituista tutkimuskohteista laskettujen tilavuuksien keskiarvon ja medianin perusteella alilouhintaa muodostuu hieman enemmän kuin ylilouhintaa, mutta tulos muuttuu päinvastaiseksi, kun tutkimuskohteen 11 suuri alilouhintatulos jätetään huomioimatta tuloksista. Yhden tutkimuskohteen tulos vaikuttaa siten merkittävästi kokonaistulokseen. Laskentapinta-alan suhteutettuna tilavuusmäärän keskiarvot ovat hyvin lähellä toisiinsa ylilouhinnan suhdeluvun ollessa hieman suurempi.

Kun tutkimuksen tuloksissa otetaan huomioon tutkimustulosten pieni otanta sekä ali- ja ylilouhinnan laskettujen tilavuuksien välinen pieni ero ja analysointitavasta riippuen aiheutuva ristiriitaisuus, ei tilavuuslaskentatulosten perusteella voida päätellä, että tarkkuuslouhituissa kohteissa ali- tai ylilouhintaa muodostuisi systemaattisesti toista enemmän. Tulosten perusteella ei siten voida myöskään havaita, että malmitappiota muodostuisi enemmän kuin sivukivilaimennusta tai päinvastoin.

Tutkimuskohteista 13.1 ja 13.2 voidaan havaita, että tarkkuuslouhitun kallioseinämäosuuden (tutkimuskohde 13.1) laskennallinen alilouhintatilavuus on pienempi, kuin lyhyemmässä seinämäosuudessa (tutkimuskohde 13.2), jossa ei käytetty raonräjäytystä. Kun tilavuuslaskentatulokset suhteutetaan laskentapinta-alan, havaitaan alilouhinnan suhdeluvun tutkimuskohteessa 13.2 olevan suurin kaikista tutkimuskohteiden tuloksista, ja merkittävästi suurempi kuin tutkimuskohteella 13.1. Ylilouhinnan suhdeluku puolestaan on hieman suurempi tarkkuuslouhituissa seinämässä suhdelukujen eron ollessa vain 0,03 yksikköä. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että raonräjäytys on tuottanut pelkkää pengerlouhintaa paremman louhintatuloksen.

### **7.3 Etäisyysseromittautulosten analyysi**

Etäisyysseromittautusten perusteella tarkkuuslouhitusta tutkimuskohteista 46 %:ssa esiintyy enemmän ylilouhintaa kuin alilouhintaa. Alilouhintaa on enemmän 31 %:ssa kohteista. Lopuissa 23 %:ssa eli kolmessa tutkimuskohteessa (1, 4 ja 8) keskiarvo on negatiivinen, mikä viittaa ylilouhinnan suurempaan kokonaismäärään. Toisaalta kohteiden mediaanit ovat kuitenkin positiivisia, mikä indikoi tutkimuskohteissa olevan enemmän poikkileikkauksia, joissa alilouhintaa esiintyy enemmän. Ruutu- ja janakaaviosta havaitaan, että kaikissa kolmessa kohteessa on useita negatiivisia muista tuloksista poikkeavia arvoja, jotka vaikuttavat keskiarvoon laskevasti. Tulosten perusteella tutkimuskohteissa 1, 4 ja 8 on siten määrällisesti enemmän alilouhintaa kuvaavia leikkauksia, mutta yksittäiset suuremmat ylilouhitut osat kalliorintauksessa pienentävät etäisyysserojen keskiarvon negatiiviseksi.

Useita negatiivisia muista tuloksista poikkeavia etäisyysserotuloksia on havaittavissa myös muissa tutkimuskohteissa, esimerkiksi kohteissa 3 ja 12. Alilouhintaa kuvaavia positiivisia muista tuloksista poikkeavia arvoja ei ole havaittavissa kuin tutkimuskohteessa 11. Edellä mainittujen havaintojen perusteella voidaan arvioida, että alilouhintaa muodostuu usein kalliorintauksessa tasaisemmin pieninä määrinä, kun taas suurilla yksittäisillä ylilouhinnoilla on vaikutusta sekä etäisyysseromittautusten keskiarvotuloksiin että tilavuuslaskentatuloksiin.

Etäisyysseromittautuloksista ei kuitenkaan pienen otannan vuoksi voida päätellä, että ali- tai ylilouhintaa muodostuisi systemaattisesti toista enemmän.

## 7.4 Tulosten epävarmuudet ja virhelähteet

Työssä käytetyn tilavuuslaskentamenetelmän tulokset ovat riippuvaisia aineistolle tehtävästä rajauksesta. Tilavuuslaskentaan tulee sisällyttää vain tarkasteltava seinämäosuus ja rajata irtolohkareet sekä penkereen juurella olevat louhekasat laskennan ulkopuolelle. Rajaukseen ei ole yhtä vakiintunutta tapaa, ja esimerkiksi penkereen ala- ja yläreunan määrittäminen tarkasti voi olla hyvin tulkinnanvaraista. Reunojen määrittämisellä on suuri vaikutus tuloksiin, koska penkereen alareunaan muodostuu usein alilouhintaa ja yläreunaan ylilouhintaa.

Tilavuustulosten tarkastelussa tulee myös ottaa huomioon, että tilavuuslaskennasta on rajattu pois muutamia selvästi alilouhittuja kallioulukkeita, jotka tiedettiin erikseen räjäytettävän tai rikotettavan mekaanisesti ennen seuraavan louhintakentän räjäytystä. Kyseisistä alilouhituista kallioulukkeista ei siten muodostu malmitappiota tai sivukivilaimennusta, mutta niiden rajaaminen pois laskennasta vaikuttaa yli- ja alilouhintatilavuuksien keskinäiseen vertailuun.

Pisteaineiston laaduntarkastuksen perusteella aineistojen absoluuttinen virhe oli maksimissaan vain muutamia senttimetrejä verkko-RTK-paikannusta hyödyntävällä satelliittipaikannuslaitteella mitattuihin referenssipisteiden koordinaatteihin verrattuna. Satelliittimittauksen arvioitu absoluuttinen virhemahdollisuus on noin 1-2 cm, joka voi osaltaan kasvattaa pisteaineiston absoluuttista virhettä. Pisteaineiston voidaan kuitenkin todeta olevan tarkkuudeltaan riittävä louhinnan tulosten arviointiin. Työssä esitettyihin tuloksiin tulee kuitenkin suhteuttaa noin 5 cm toleranssi havaintopisteiden sijainneille. Lisäksi tilavuuslaskennan ruutukokona sekä pintamallien kolmioinnissa kolmioiden nurkkapisteen maksimietäisyytenä käytettiin viittä senttimetriä.

Toteutuneet porausreiät digitoitiin muodostamalla 3D-murtoviivoja pistepilviaineistoista havaittujen tarkkuuslouhintareikien puolikkaiden perusteella. Murtoviivat on digitoitu porausreikien seinämiä kuvaaviin pisteisiin eikä reiän todelliseen keskikohtaan. Digitoitavasta johtuvan sijaintivirheen voidaan olettaa olevan reiän säteen eli  $76 \text{ mm} / 2 = 38 \text{ mm}$  suuruinen.

Malmimallit muodostetaan kairaustuloksiin perustuvista mineralisaatiomalleista. Tutkimuskairaukset ovat kalliita toteuttaa, eikä kairauspisteitä ole taloudellisesti kannattavaa sijoittaa hyvin lähelle toisiaan. Mineralisaatio- ja malmimallien muodostukseen sisältyy aina jonkin verran epävarmuutta, sillä kairaustulosten väliin jäävien alueiden mineralisaatio ei ole täsmällisesti tiedossa. Mahdolliset epätarkkuudet malmimalleissa saattavat aiheuttaa merkittäviäkin määriä malmitappiota ja sivukivilaimennusta. Tutkimuksessa esitetyt malmimalleista muodostetut suunnitellut tarkkuuslouhintapinnat ovat kuitenkin paras mahdollinen arvio malmin ja sivukiven rajapinnoista.

## 7.5 Kehitysehdotukset

Työssä esitettyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että poraustarkkuudella on suuri vaikutus malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumisessa kapeiden malmijuonien tarkkuuslouhinnassa. Poravaunun 3D-koneohjausjärjestelmää hyödyntämällä poraustulos vastaa parhaimmillaan hyvin täsmällisesti reiän suunniteltua sijaintia ja kaltevuutta (kuvat 25 ja 34). Poikkileikkaustulokset osoittavat, että koneohjausjärjestelmästä huolimatta poraussuunnitelman ja toteutuneiden porausreikien välillä voi esiintyä huomattavaakin eroa

(kuva 32). Poraustarkkuuden sijaintivirhelähteenä voi olla esimerkiksi ongelmat koneenohjausjärjestelmän paikannuksessa tai kalibroinneissa. Aina porausta ei voida aloittaa suunnitellusta sijainnista esimerkiksi kalliopinnan epätasaisuuden vuoksi. Usein tällaisissa tilanteissa kenttäreikien porauksessa poravaunun operaattori aloittaa porauksen lähimmästä mahdollisesta sijainnista ja suuntaa porauksen suunnitellun porareiän päätepisteeseen. Sen sijaan malmi-sivukivi -kontaktipinnan tarkkuuslouhintareikien porauksessa operaattorin tulee ottaa huomioon reiän uuden sijainnin suhtautuminen vierekkäisiin rakoreikiin sekä viereiseen malmikenttään. Mikäli reiän uusi lähtösijainti ja kaltevuus poikkeavat paljon tarkkuuslouhintalinjan vierekkäisistä rei'istä, voidaan kyseisestä kohdasta odottaa ongelmia tarkkuuslouhintatuloksessa. Porausreiän uusi sijainti tulee myös mahdollisuuksien mukaan sijoittaa sivukivikentän puolelle, sillä sivukivilaimennus on malmitappioon verrattuna parempi vaihtoehto. Kehitysehdotuksena suositellaan poravaunun 3D-koneohjauksen hyödyntämisen lisäksi sen paikannustarkkuuden ja kalibrointien tarkastusta säännöllisin väliajoin. Lisäksi suositellaan huolehdittavan poravaunun operaattorin riittävästä perehdyttämisestä kuhunkin tarkkuuslouhittavan kentän poraussuunnitelmaan, jotta porauksella voidaan ehkäistä ylimääräisen malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumista.

Kuten edellä todettiin, on kallionpinnan epätasaisuuksilla vaikutusta poraussuoritukseen. Jotta poraus voidaan suorittaa suunnitellusti, on louhinnasta aiheutuvien kynsien minimointiin kiinnitettävä huomiota. Mikäli epätasaisuuksia toistuvasti muodostuu, tulee virhelähteet paikantaa ja muuttaa menetelmiä tarvittaessa seuraaviin louhintoihin. Tilanteessa, jossa kynsiä on jo muodostunut ja ne selvästi hankaloittavat porauksen suorittamista, voidaan poraussuunnittelussa tiheän pistepilviaineiston avulla reikien sijoittelua optimoida porauksen kannalta edullisiin sijainteihin. Menetelmä kuitenkin kasvattaa poraussuunnittelutyön määrää, ja menetelmän hyödyllisyyttä tulee tarkastella tapauskohtaisesti.

Raonräjäytyksen 1,2 metrin reikävälillä todettiin tuottavan Kaapelinkulman kaivoksella suorilla seinämäosuuksilla sileät ja suunnitelmia vastaavat kalliopinnat, mikäli poraus oli toteutettu suunnitellulla tavalla ja kalliossa ei esiintynyt merkittävää rakoilua. Tarkkuuslouhintalinjan jyrkkiin käännöksiin ehdotetaan kokeiltavaksi eri raonräjäytyksen reikäväliä, panostamattomia apureikiä rakoreikien välille tai kokonaan eri tarkkuuslouhintamenetelmää.

Tutkimuksessa toteutuneita porareikiä voitiin digitoida pistepilviaineistoista vain niiltä osin, kun porareikien puolikkaita oli aineistosta havaittavissa. Digitoitujen reikien sijainnit ja kaltevuudet tarjosivat tärkeää informaatiota porauksen toteutumisesta verrattuna suunniteltuihin porareikiin. Droonilla suoritettavan ilmakuvausten ja fotogrammetrisen mallinnuksen lisäksi toiseksi mittausmenetelmäksi ehdotetaan reikäsuoruuksmittausta ja sen tulosten yhdistämistä kalliopenkereestä mitattuun geometriatietoon. Reikäsuoruuksmittauksilla reikien tarkka geometria saadaan myös niistä rei'istä, joita ei pistepilvessä ole näkyvissä. Reikien sijainti- ja kaltevuustietojen lisäksi reikäsuoruuksmittauksella saadaan selville reikien taipuma, joka voidaan ottaa huomioon panostuksessa sekä seuraavien reikien porauksessa.

Pengerlouhinnan porausreikien ja panostuksen suunnittelussa suositellaan käytettävän hyödyksi pistepilviaineiston tuottamaa informaatiota todellisesta edusta kalliopenkerein ja louhintakentän ensimmäisen reikärivin välillä. Todellisen edun huomioiminen suunnittelussa parantaa louhinnan turvallisuutta kivien sinkoiluriskiä vähentämällä ja tuottaa paremman louhintatuloksen lohkaroitumisen kannalta.

## 7.6 Kokemukset ja suositukset menetelmistä ja laitteistoista

Yhden kalliopenkereen mittaukseen kului yhdeltä henkilöltä noin 1,5 tuntia, josta droonilla suoritettavan ilmakuvauksen kesto oli 15-25 minuuttia. Lisäksi kuva-aineiston mallinnusprosessin valmisteluihin kului myös noin 1,5 tuntia. Suurin osa käytetystä ajasta liittyi signaalipisteisiin, kuten niiden sijoitteluun mittausalueelle, pisteiden keskikohtien satelliittipaikkannukseen, koordinaattien muokkaukseen ja siirtämiseen tietokoneelle sekä signaalipisteiden ja koordinaattien yhdistämiseen mallinnusohjelmistossa. Markkinoilla on olemassa lentomittauksiin soveltuvia drooneja, jotka on varusteltu RTK-mittausta hyödyntävillä GNSS/IMU-suorapaikannusjärjestelmillä. Kyseisillä laitteilla voidaan vähentää tai jopa luopua kokonaan signaalipisteistä ja saavuttaa silti haluttu tarkkuustaso mittaustuloksille. Tarkalla GNSS/IMU-suorapaikannusjärjestelmällä varustetun droonin hyödyntämisellä voi mahdollisesti nopeuttaa mittaus- ja mallinnusprosessin kestoa.

3D-mallien tilavuuslaskenta eri tietokoneohjelmistoilla osoittautui hankalaksi, kun aineisto sisältää useampia z-akselin arvoja samassa xy-tason pisteessä. Kyseinen tilanne ilmenee esimerkiksi kalliorintauksesta, joka on ryöstänyt penkereen juuresta. Pisteaineiston kolmiointi voidaan toteuttaa asetuksilla, joissa kolmiot muodostuvat lähes pystysuoraan kyseisissä kohdissa ja päällekkäisten pisteiden ongelmaa ei esiinny. Kyseisellä menetelmällä koverat pinnat seinämässä eivät kuitenkaan mallinnu pintamalliin. Tässä työssä käytetty laskentamenetelmä mahdollistaa ryöstöjen huomioimisen laskelmissa. Menetelmän yhtenä heikkoutena on kuitenkin sen hitaus, sillä aineisto oli manuaalisesti rajattava suunnitellun pinnan mukaiseksi. Lisäksi laskennan tulokset ovat riippuvaisia rajauksen suorituksesta, ja virheellisesti rajattu aineisto kasvattaa laskennan virhettä. Menetelmällä saadaan kuitenkin oikein käytettynä hyvä arvio toteutuneesta louhintatuloksesta.

Droonia testattiin myös koko avolouhoksen kattavien ilmakuvauksien suorittamisessa. Kuva-aineistosta mallinnetulle avolouhoksen pistepilviaineistoille havaittiin monia erilaisia hyödyntämissovellutuksia, kuten kaivoksen tuotantomäärien seuranta massalaskelmien avulla, louhinnan etenemisen ja suunnitteluaineistojen visuaalinen hahmottaminen palaverissa tai kokouksissa sekä pisteaineiston toimiminen lähtötietona malmimallien päivityksille sekä louhintatyön suunnittelulle. Avolouhoksen tiheä pistepilvi tarjoaa yksityiskohtaisempaa tietoa kuin satelliittipaikantimella tai takymetrillä kartoitettu harva pisteaineisto. Louhintatyön suunnittelun hyödyntämiskohteiksi havaittiin muun muassa porareikien sijoittelu sekä louhintakenttien ensimmäisen reikärivin todellisen edun huomiointi.

Ilmakuvamittausten lisäksi drooneja testattiin räjäytysten videokuvaamisessa. Normaalin räjäytysvartion lisäksi droonin lähettämän reaaliaikaisen videokuvan avulla voidaan varmistaa, ettei räjäytystyön vaarallisella alueella havaita sinne kuulumatonta liikettä. Tallennettua videokuvaa käytettiin räjäytystyön laadunvarmistukseen mahdollisia räjäytyksen virhelähteitä poissulkemalla. Videota hidastamalla ja videon yksittäisiä kuvia tutkimalla voitiin tarkastella rivien tai yksittäisten panosten syttymisajankohtia ja havaita mahdollisia räjähtämättömiä reikiä sekä analysoida louhekanan ja kivien liikettä räjäytystyön aikana.



### **7.7 Jatkotutkimusehdotukset**

Tässä diplomityössä tarkkuuslouhitut tutkimuskohteet olivat kaikki räjäytetty samalla raonräjäytystekniikalla. Myös tutkimuskohteiden otanta oli suppea. Jatkotutkimukseksi ehdotetaan laajempaa ja enemmän louhintateknisiin yksityiskohtiin keskittyvää tutkimusta, jossa selvitetään eri tarkkuuslouhintamenetelmien ja -tekniikoiden vaikutusta muodostuviin yli- ja alilouhintamääriin. Tutkimuksen mittausmenetelmiksi ehdotetaan reikäsuoruuksimittauksia sekä UAV-laitteella suoritettavan kuvauksen ja fotogrammetrian yhdistelmää.

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että optimaalisen louhintatuloksen saavuttaminen raonräjäytysmenetelmällä ja 1,2 metrin reikävälillä on haasteellista tarkkuuslouhintalinjan jyrkissä käännoksissa. Jatkotutkimuksena ehdotetaan selvittämään, millä raonräjäytyksen reikävälillä, panostustekniikoilla ja räjähdysainemäärillä saavutetaan paras louhintatulos kyseisissä tarkkuuslouhintalinjan taitekohdissa.

## 8 Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kolmiulotteisten geometriatietojen hyödynnettävyyttä avolouhinnan ja erityisesti raonräjäytysmenetelmällä toteutettavan tarkkuuslouhinnan tulosten arvioinnissa ja louhintatyön kehittämisessä malmitappion ja sivukivilaimennuksen optimoinnin näkökulmasta.

Malmitappion ja sivukivilaimennuksen määrien tutkimusmenetelmäksi valittiin tarkkuuslouhintaräjäytyksissä muodostuneiden ali- ja ylilouhintamäärien vertailu tilavuuslaskentojen sekä poikkileikkauksista suoritettavien etäisyseromittausten avulla. Sekä tilavuuslaskenta- että etäisyseromittaustulosten perusteella tutkimuskohteissa esiintyi useammin enemmän ylilouhintaa kuin alilouhintaa. Etäisyseromittaustuloksista havaittiin, että osassa tutkimuskohteista alilouhintaa esiintyi kalliorintauksissa tasaisesti pieninä määrinä, kun taas suurilla yksittäisillä ylilouhinnoilla oli merkittävä vaikutus tuloksiin. Tilavuuslaskentatulosten perusteella tutkimuskohteissa 1-13.1 alilouhintatulosten keskiarvo ( $10,7 \text{ m}^3$ ) oli 5 % suurempi kuin ylilouhintatulosten keskiarvo ( $10,2 \text{ m}^3$ ). Keskiarvovertailuun vaikutti kuitenkin suuresti tutkimuskohteen 11 muita kohteita poikkeavasti suurempi alilouhintatulostus. Kun kyseinen yksittäinen tulos jätettiin laskennan ulkopuolelle, oli ylilouhinnan keskimääräinen tilavuus alilouhintaa suurempi. Tutkimuksen pienen otannan, virhelähteiden sekä ali- ja ylilouhinnan tilavuuslaskentatulosten välisen pienen eron vuoksi ei voitu päätellä, että ali- tai ylilouhintaa muodostuisi raonräjäytyksessä systemaattisesti toista enemmän.

Tutkimuksessa arvioitiin myös raonräjäytysmenetelmän vaikutusta louhintatulokseen. Tutkimuskohteessa 13 ilman raonräjäytystä louhitun 10 metrin pituisen kallioseinämäosuuden havaittiin olevan epätasainen ja louhinnasta muodostui enemmän alilouhintaa kuin viereisestä kaksi kertaa pitemmästä kallioseinämäosuudesta, joka louhittiin raonräjäytyksenä. Tarkkuuslouhittujen tutkimuskohteiden vertailuaineistona oli lisäksi kaksi sivukivikenttien pengerlouhinnoissa muodostunutta kalliorintausta. Poikkileikkausten ja 3D-aineiston visuaalisen tarkastelun perusteella pengerlouhituissa vertailukohteissa ylilouhintaa muodostui huomattavan paljon kalliopinnan ja poraussuunnitelmapinnan etäisyyden ollessa jopa useita metrejä. Kyseisellä tekniikalla suoritettu louhinta todettiin epäsovivaksi malmi- ja sivukivikenttien välisiin tarkkaa louhintatulosta vaativiin räjäytyksiin. Sen sijaan raonräjäytyksen 1,2 metrin reikävälillä havaittiin tuottavan pääsääntöisesti sileät ja suunnitelmia vastaavat kalliopinnat, mikäli poraus oli toteutettu suunnitellulla tavalla ja kalliossa ei esiintynyt merkittävää rakoilua. Tulosten perusteella raonräjäytyksellä todettiin saavutettavan malmitappion ja sivukivilaimennuksen optimoinnin kannalta parempia louhintatuloksia kuin normaalilla pengerlouhinnalla. Tarkkuuslouhintalinjojen jyrkät käännökset havaittiin kuitenkin haastaviksi, ja niissä muodostui usein ylilouhintaa.

Poikkileikkausten ja 3D-aineistojen tarkastelun avulla havaittiin, että poraustarkkuus on kallion geologisten olosuhteiden ohella yksi merkittävimpiä tekijöitä malmitappion ja sivukivilaimennuksen muodostumisessa, sillä pienistäkin systemaattisista virheistä reikien sijainneissa tai kaltevuuksissa voi aiheutua useita kymmeniä kuutiometrejä ali- tai ylilouhintaa. Louhittujen kalliopenkereiden kolmiulotteisen geometriatiedon ja suunnitelma-aineistojen vertailun havaittiin tuottavan hyödyllistä tietoa louhintatuloksen arvioinnissa ja virhelähteiden havaitsemisessa verrattuna pelkästään kaivostyömaalla suoritettavaan kalliorintauksen visuaaliseen tarkasteluun. Mittaustiedon tarkastelun avulla louhintaa voidaan kehittää ja malmitappion sekä sivukivilaimennuksen muodostumista vähentää, kun louhinnan virhelähteet ja ongelmakohdat on ensin havaittu ja todettu.

## Lähdeluettelo

Alho P., Hyyppä H., Hyyppä J., Flener C., Kasvi E., Vaaja M., Kukko A., Lotsari E., Hohenenthal J., Kurkela M., Kaartinen H. ja Haggrén H. 2011. Uudet mittausmenetelmät jokiympäristön kartoituksessa. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, No. 3

Atlas Copco 2008. Surface Drilling Handbook. 4.painos.

Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. Verkkojulkaisu. [Viitattu 30.7.2019] Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2012-41\\_laserkeilauksen\\_kaytto\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf)

Dominy, S., Annels, A.E., Camm, G.S., Barr, S.P. & Wheeler, P. 1997. Geology in the resource and reserve estimation of narrow vein deposits. Exploration and Mining Geology.

Dragon Mining 2019. Kaapelinkulma Gold Mine. [Viitattu 5.5.2019] Saatavissa: <http://www.dragonmining.com/kaapelinkulma>.

Eades, R. & Perry, K. 2018. Understanding the connection between blasting and highwall stability. International Journal of Mining Science and Technology.

EFEE (European Federation of Explosives Engineers) 2019. Blast design and analysis from aerial imagery. Newsletter 2019-07. [Verkkolehti] [Viitattu 29.8.2019] Saatavissa: [https://efee.eu/wp-content/uploads/2019/07/2019-07-Newsletter2-\\_Summer-2019.pdf](https://efee.eu/wp-content/uploads/2019/07/2019-07-Newsletter2-_Summer-2019.pdf)

Fryer, J., Mitchell, H. & Chandler, J. 2007. Applications of 3D measurement from images. Dunbeath, Scotland: Whittles Publishing. 335 s.

Heiniö, M. 1999. Rock excavation handbook: for Civil Engineering. Tampere: Sandvik Tamrock. 363 s.

Honkavaara, E., Markelin, L. & Nurminen, K. 2011. Digitaalinen ilmakuvauus ja sen mahdollisuudet. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 22, No. 3

Hustrulid, W. 1999. Blasting principles for open pit mining: Volume 1, General design concepts. Rotterdam: Balkema. 382 s. ISBN 90-5410-459-7.

Janič, P. 2017. 3d Modeling Methods In Planning Of Technological Processes In Quarry. Surveying Geology & Mining Ecology Management (SGEM). Sofia.

Kraus, K. 2007. Photogrammetry: Geometry from images and laser scans. 2. painos. Berliini: De Gruyter. 459 s. ISBN 978-3-11-019007-6

Lappalainen, P., Hakapää, A. & Paalumäki, T. 2015. Kaivos- ja louhintatekniikka. 3. uud. painos. Helsinki: Opetushallitus: Kaivosteollisuus FinnMin. 479 s. ISBN 978-952-13-5778-7.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. uud. p. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Moser, P. 2004. Less fines production in aggregate and industrial minerals industry. Proceedings of the 30th annual conference on Explosives & Blasting Technique.

Moser, P., Ganster, M. & Gaich, A. 2007. Experience with and benefits from the use of 3D Stereophotogrammetry for blasting design and control. Proceedings of the 33rd annual conference on explosives and blasting technique, Nashville, TN, Vol. I: 315-327

Munaretti, E., McClure, R. A., Mendonça, C. S., Kloeckner, J., Scussiatto, M. P., Souza, L. O., Kuckartz, T. & Gewher, J. F. 2013. Blasting Optimization using 3D Photogrammetry in a South Brazilian Quarry.

Nonel – käyttäjän opas. [Viitattu 9.12.2019]. Saatavissa: <https://forcit.fi/assets/product-brochures/Tuotetieto.pdf>

Olofsson, S. O. 1997. Applied Explosives Technology for Construction and Mining. 2. painos. Ärla: APPEX. 304 s. ISBN 91-7970-634-7.

Patikova, A. 2004. Digital Photogrammetry In The Practice Of Open Pit Mining. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 34.

Persson, P., Holmberg, R. & Lee, J. 1994. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton (FL): CRC Press. 540 s. ISBN 0-8493-8978-X.

Rönnholm, P. 2010. Orientation and integration of images and image blocks with laser scanning data. Väitöskirja. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu.

Salmenperä, H. 2004. Fotogrammetria. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Geoinformatiikan laboratorio, Opetusmoniste, vol. 4.

Salmirinne, H., Hyvönen, E., Karinen, T., Konnunaho, J., Kurimo, M., Middleton, M., Niiranen, T., Panttila, H., Pasanen, A. & Turunen, P. 2017. UAV-MEMO-projekti, osa I. Miehittämättömät ilma-alukset malminetsinnässä ja kaivostoiminnassa. Geologian tutkimuskeskus.

Shervais, K. 2015. Structure from Motion Introductory Guide. UNAVCO. Version Oct 22, 2015. [Viitattu 6.11.2019]. Saatavissa: <https://www.unavco.org/education/resources/modules-and-activities/feld-geodesy/module-materials/sfm-intro-guide.pdf>

Stewart, D. & Wiseman, T. 2017. Drill and Blast Improvement Project Using Photogrammetry, GPS and Drill Navigation Systems. In: Proceedings of 43rd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, FL.

Stiehr, J. F. 2011. ISEE Blasters' Handbook. 18th ed. Cleveland: International Society of Explosive Engineers. 1030 s. ISBN 978-1-892396-19-8.

Tose, S. S. J. 2006. A Review of the Design Criteria and Practical Aspects of Developing a Successful Pre-split. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 525-546 s.

Vuolio, R. & Halonen, T. 2010. Räjätystyöt. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy. 422 s. ISBN 978-952-5785-34-0.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M. 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179.

Wiegand, J.E. & Valentim, L. 2016. Using photogrammetry data from unmanned aerial vehicle (UAV), small unmanned aircraft systems (sUAS) for blast design. Proceedings of the 42nd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Cleveland: International Society of Explosives Engineers.

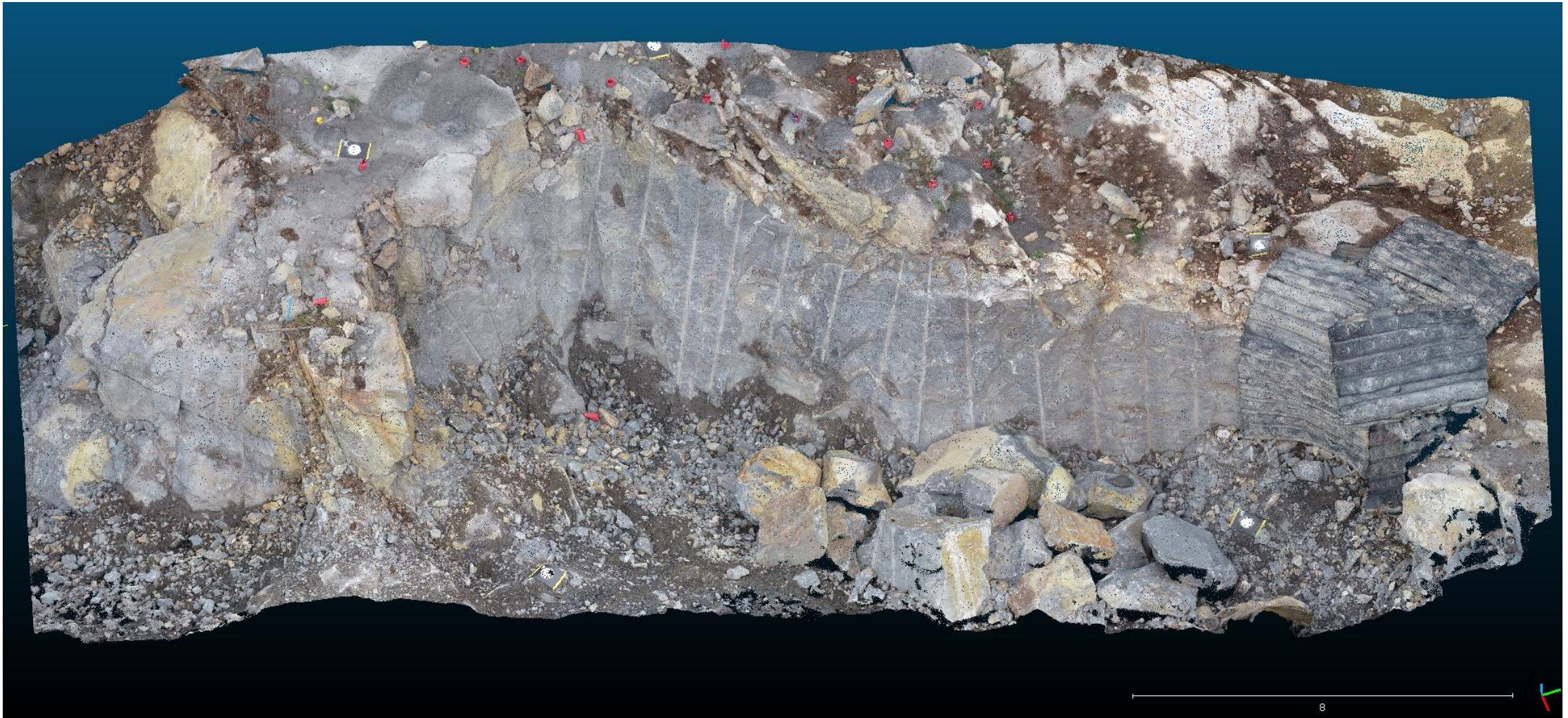
Wikman, E. 2010. Takymetri – Mittaustyökalu moneen käyttöön. *Maankäyttö* 4/2010. [Verkkolehti] [Viitattu 31.10.2019]. Saatavissa: [http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk410/mk410\\_1416\\_wikman.pdf](http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk410/mk410_1416_wikman.pdf)

Zou, D. (2017) Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore. 699 s. DOI 10.1007/978-981-10-1989-0.

## Liiteluettelo

- Liite 1. Tutkimuskohde 1, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 2. Tutkimuskohde 2, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 3. Tutkimuskohde 3, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 4. Tutkimuskohde 4, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 5. Tutkimuskohde 5, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 6. Tutkimuskohde 6, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 7. Tutkimuskohde 7, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 8. Tutkimuskohde 8, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 9. Tutkimuskohde 9, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 10. Tutkimuskohde 10, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 11. Tutkimuskohde 11, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 12. Tutkimuskohde 12, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 13. Tutkimuskohde 13, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 14. Tutkimuskohde 14, kuvankaappaus pistepilviaineistosta
- Liite 15. Tutkimuskohde 15, kuvankaappaus pistepilviaineistosta

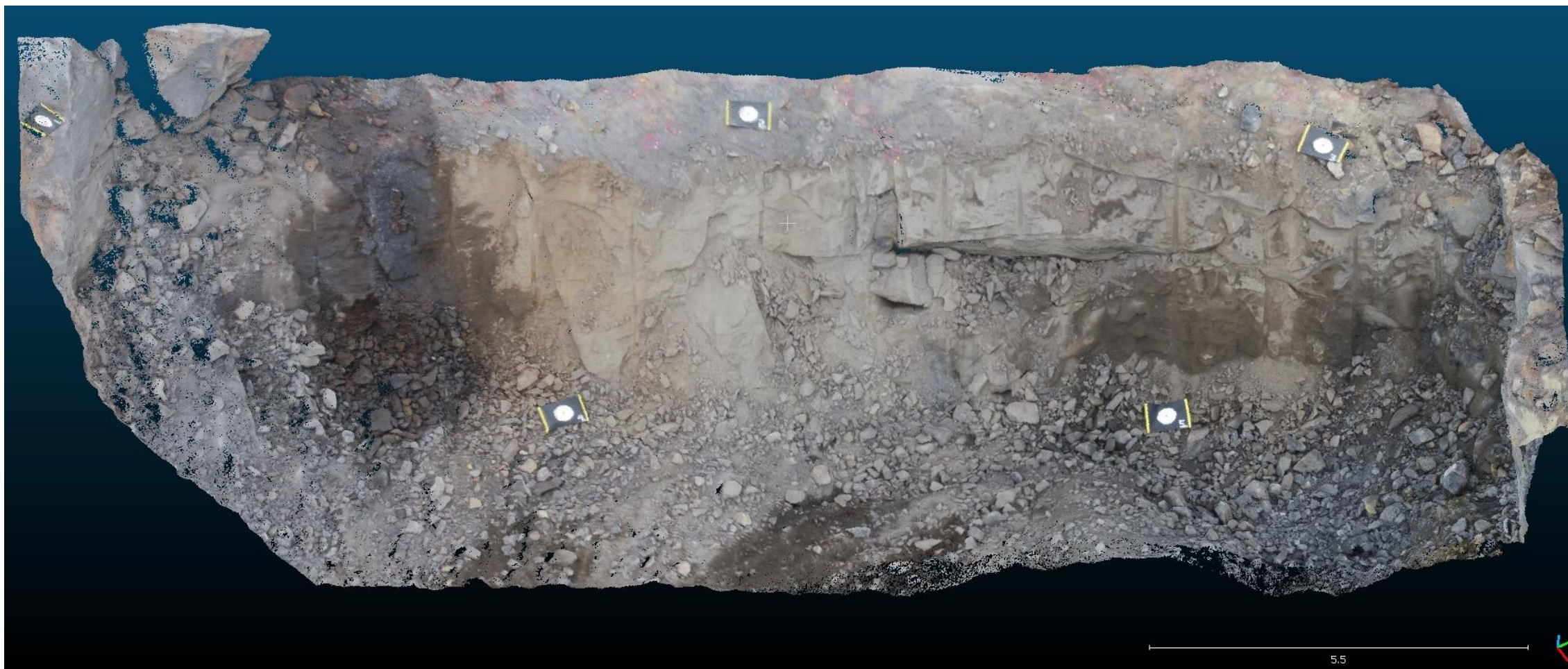




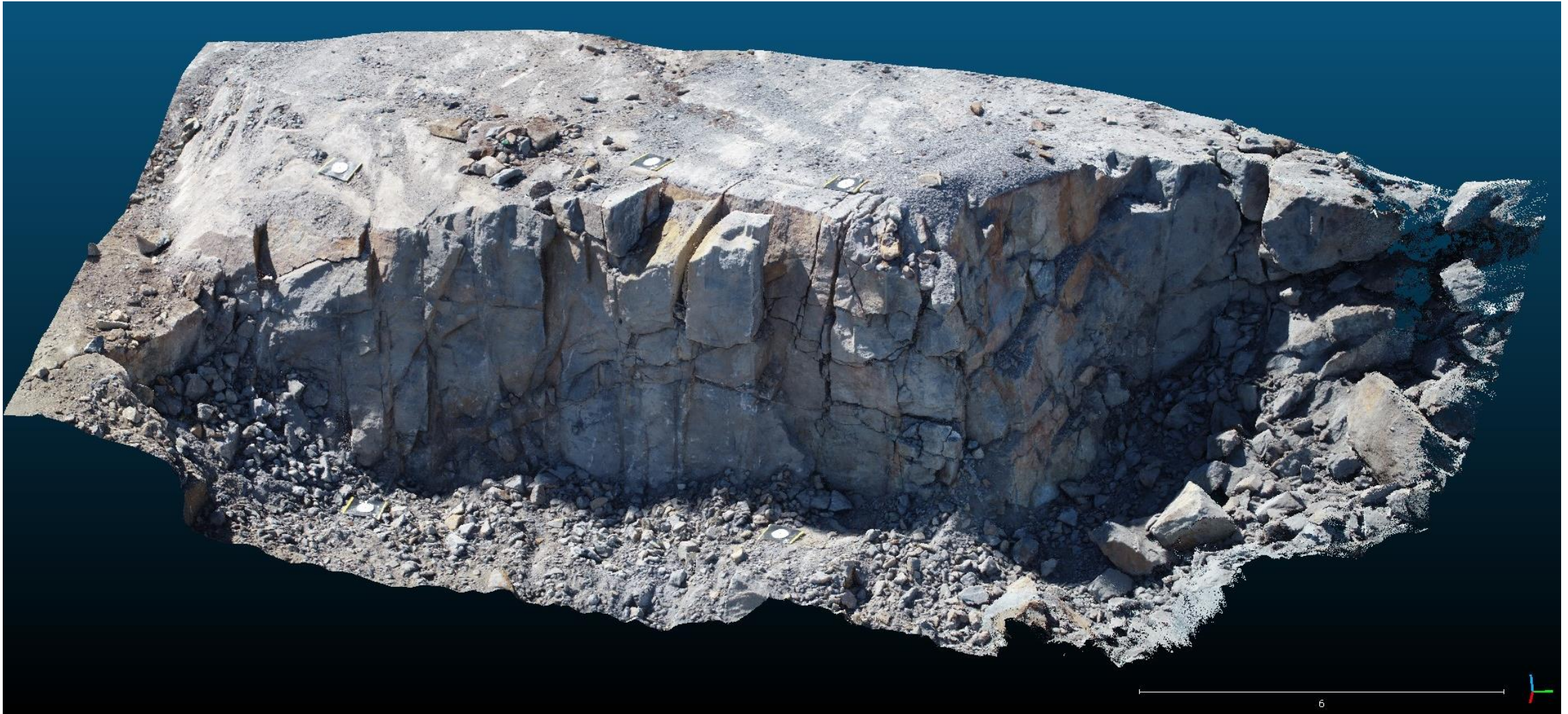


## Liite 2: Tutkimuskohde 2

Liite 2 (1/1)



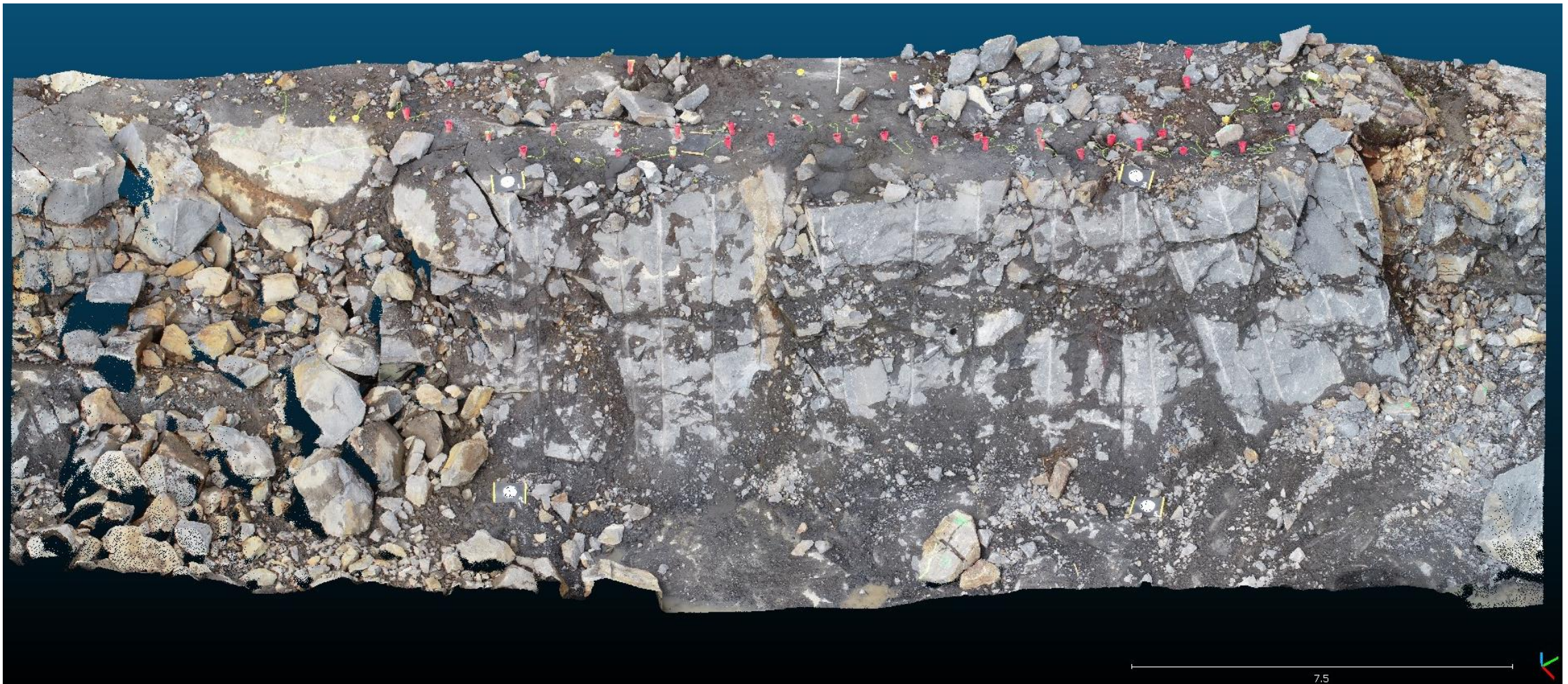




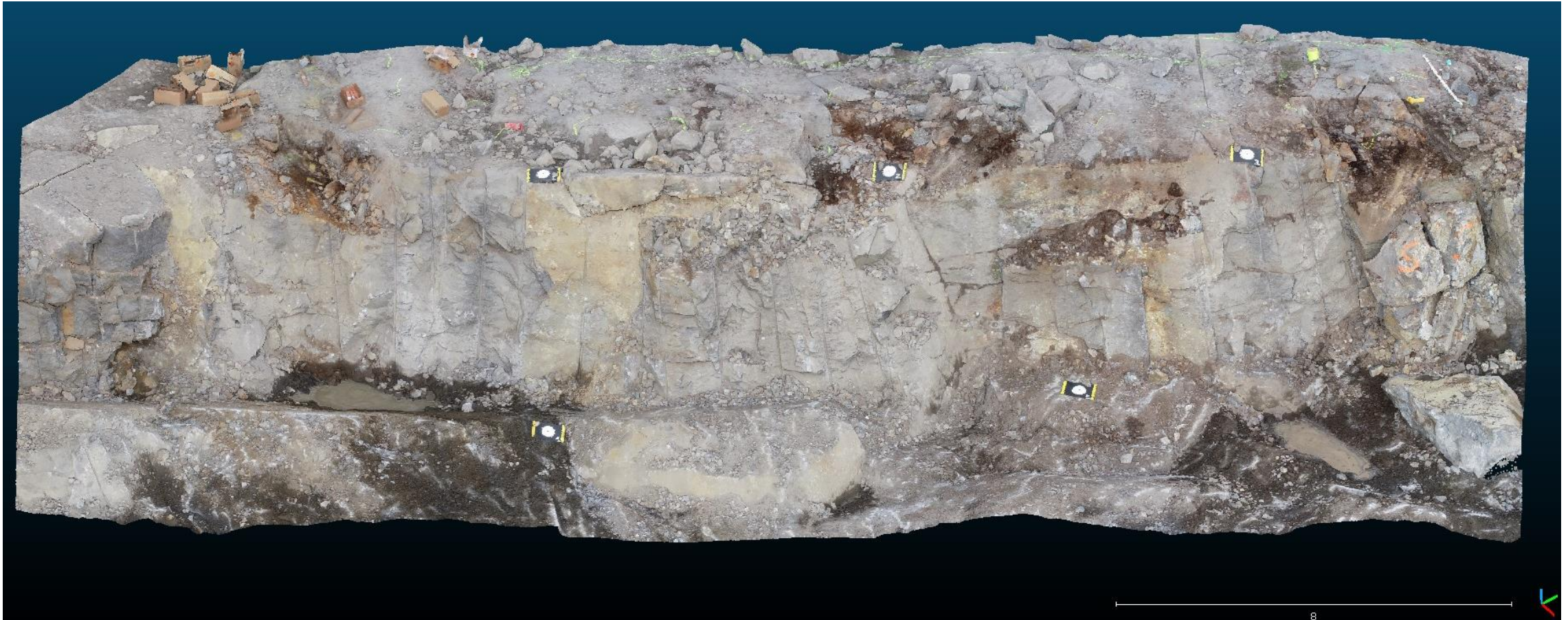


## Liite 4: Tutkimuskohde 4

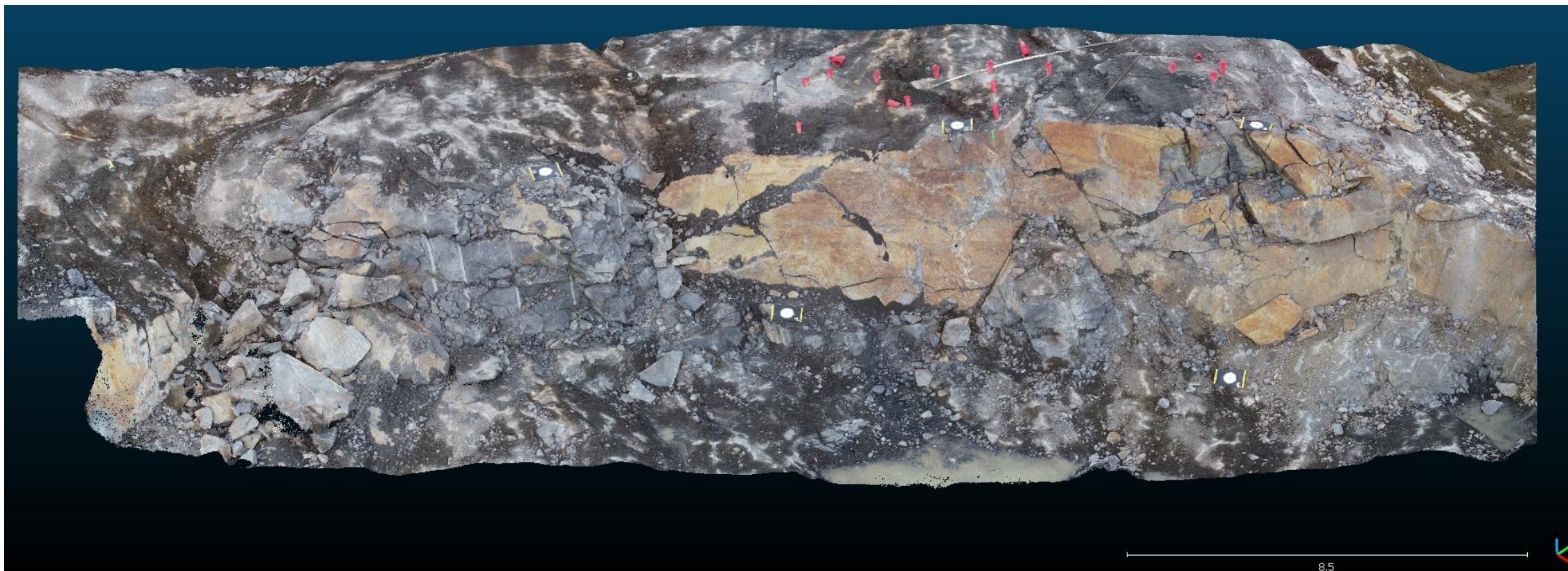
Liite 4 (1/1)



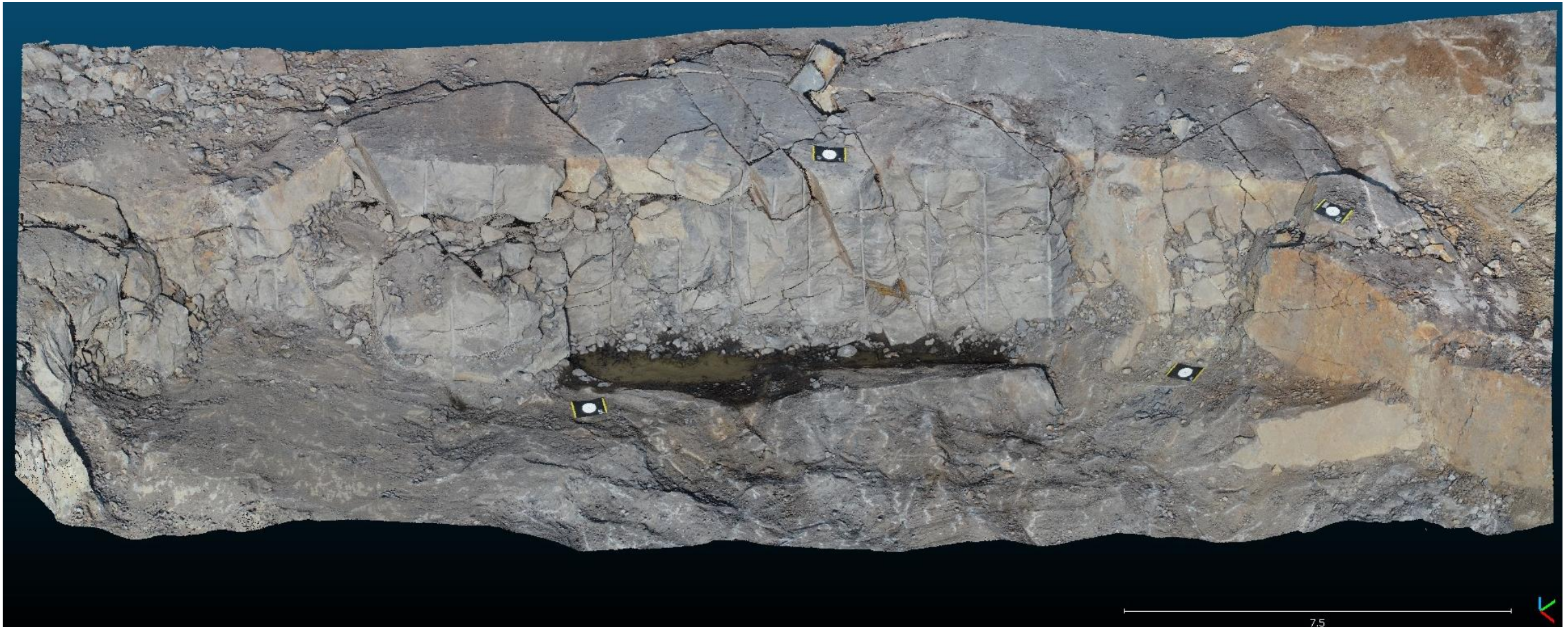




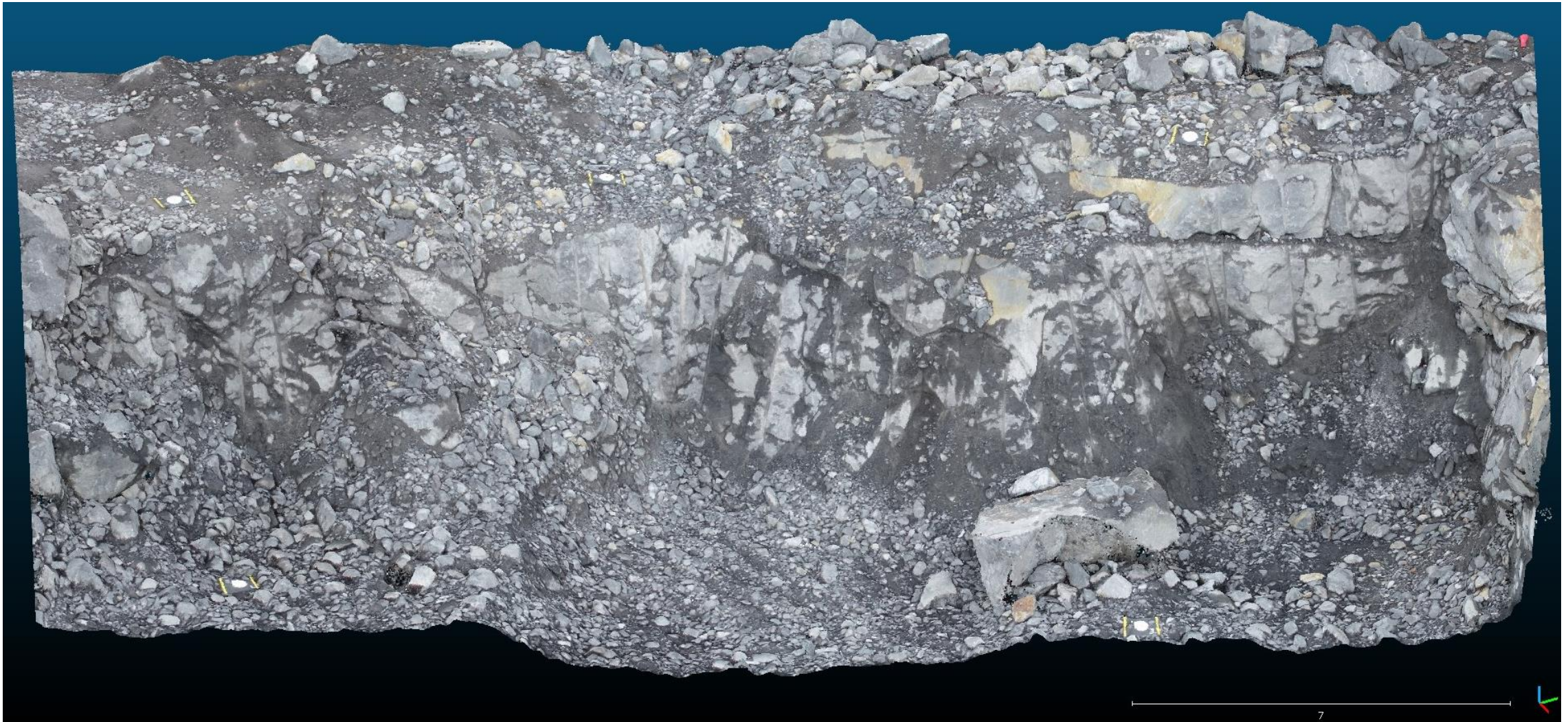




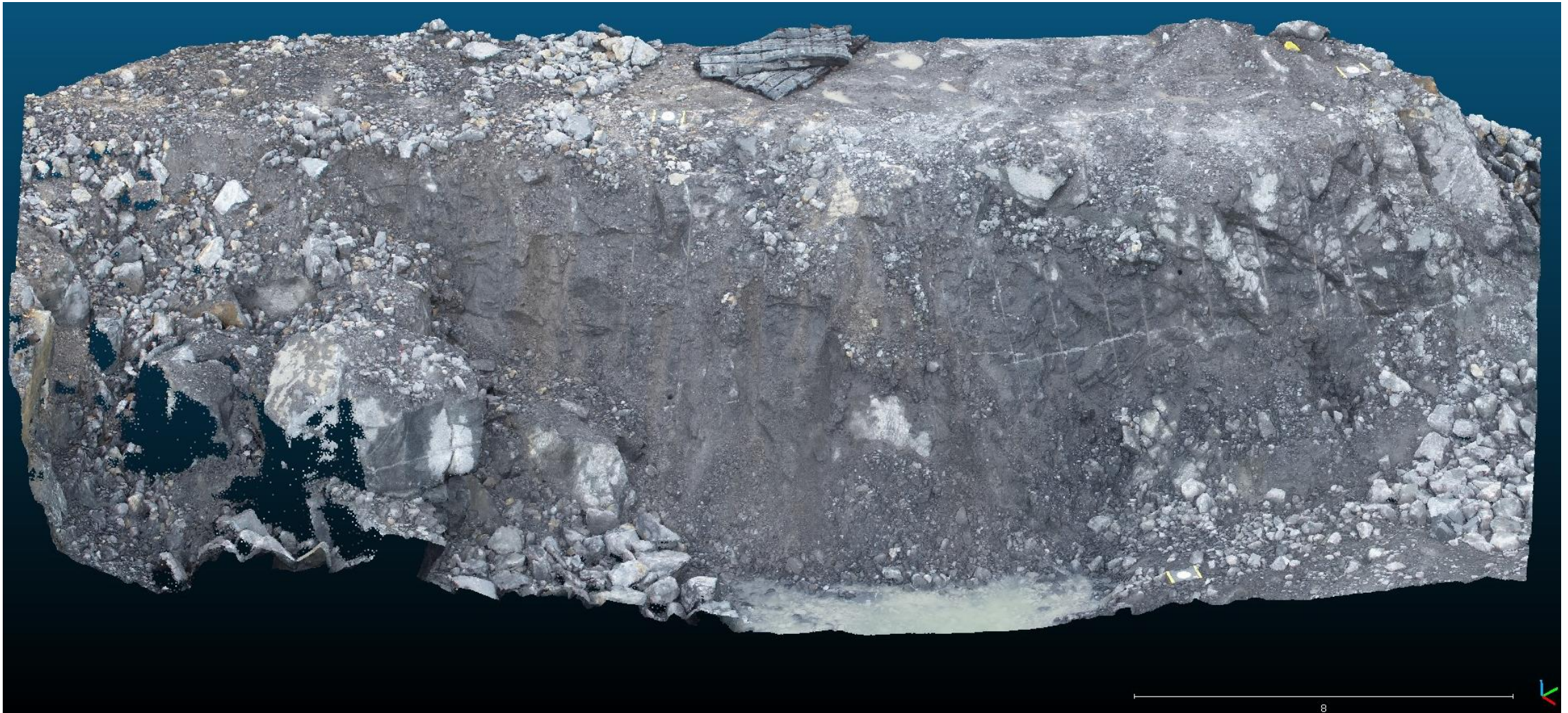




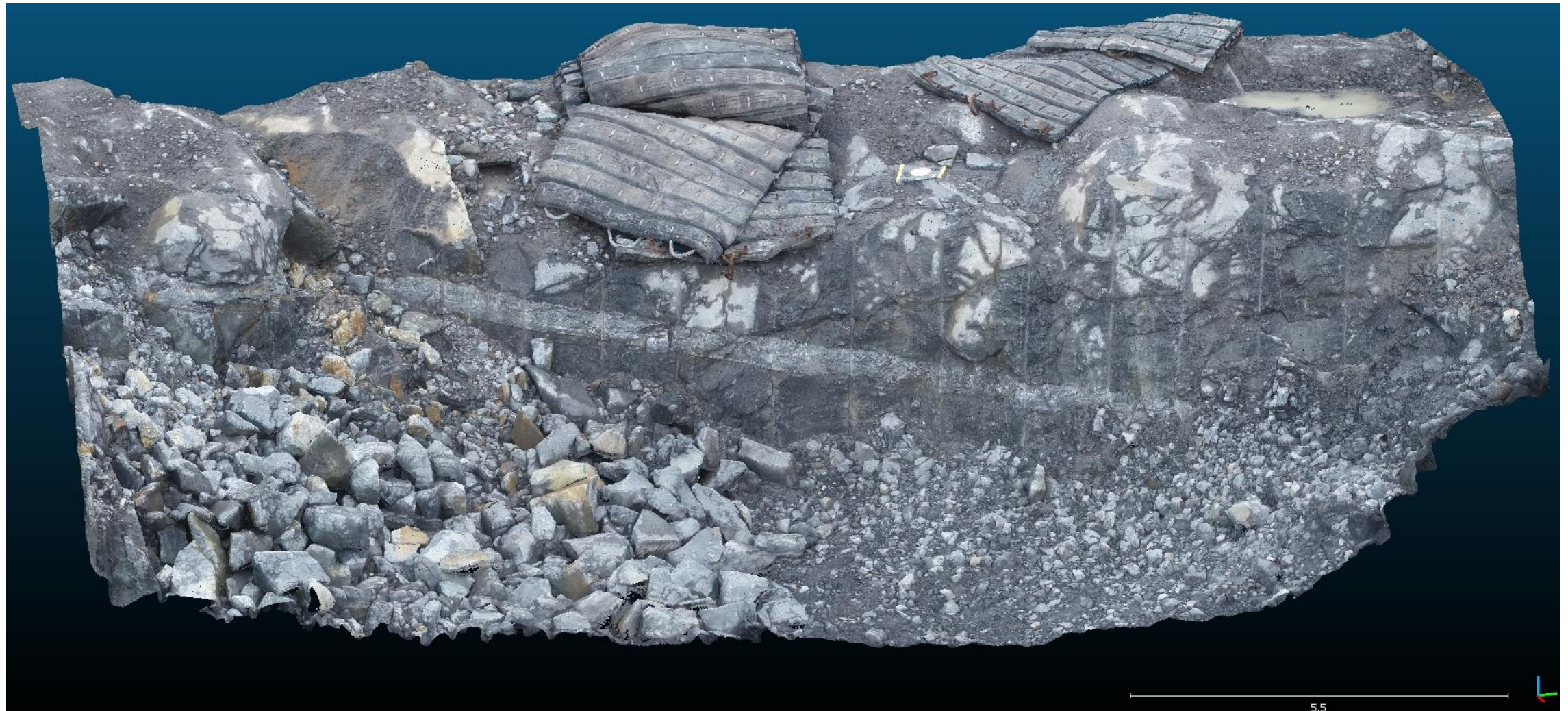








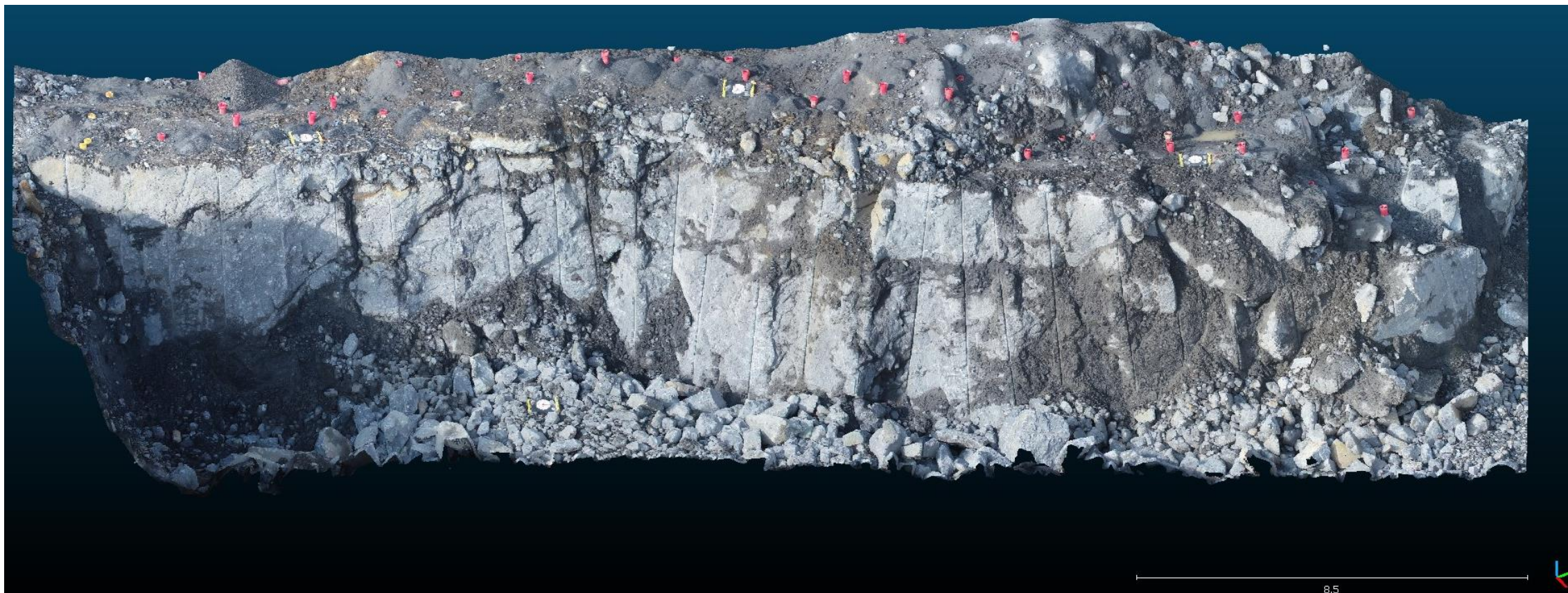




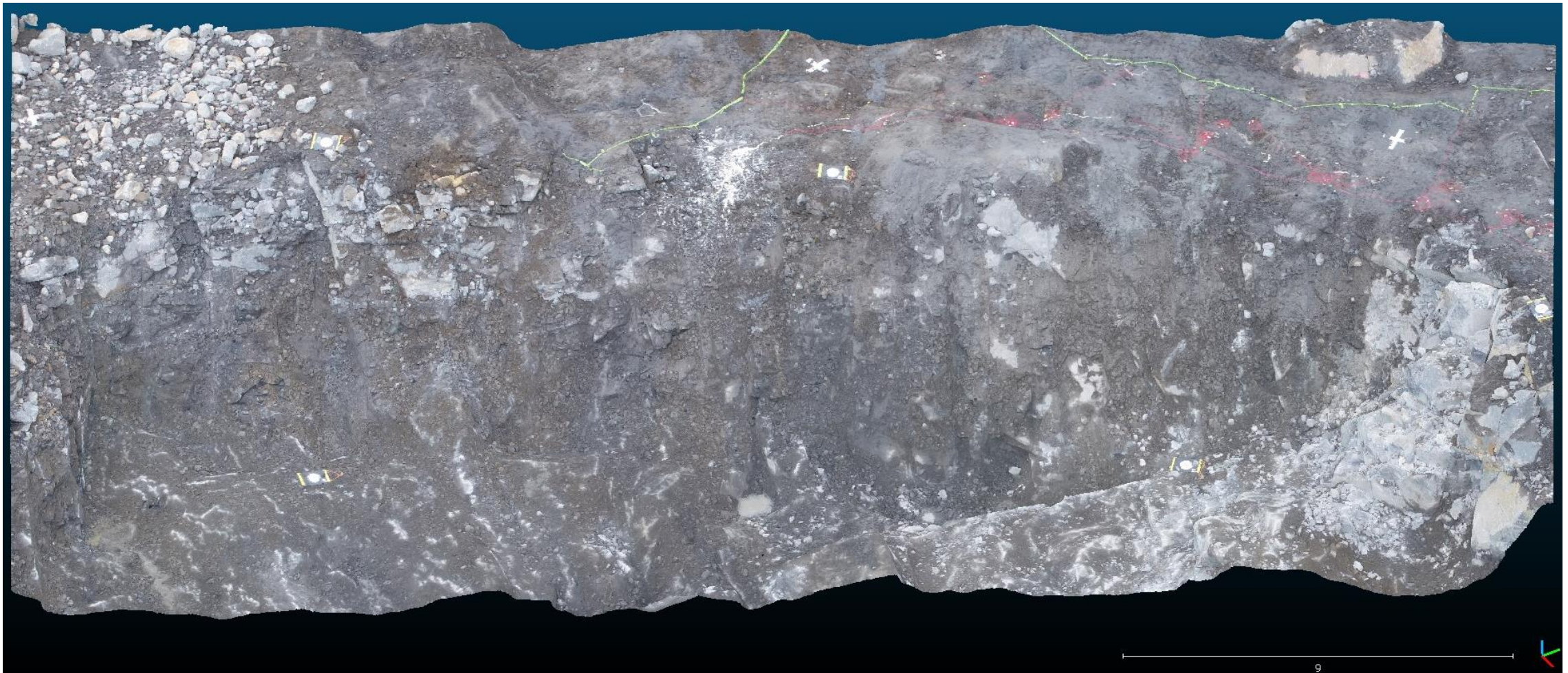














**Liite 14:** Tutkimuskohde 14

Liite 14 (1/1)





